



Tiago Filipe Agostinho Cardoso

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de *grouts*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientadora: Maria Teresa Varanda Cidade, Professora Auxiliar
com Agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Paulina S. F. Faria Rodrigues
Arguente: Professora Doutora Catarina Almeida da Rosa Leal
Vogal: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2015

“Copyright” Tiago Filipe Agostinho Cardoso, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Não queria deixar passar a oportunidade de expressar a minha gratidão ao Professor Luís Gonçalo Correia Baltazar pela disponibilidade constante que demonstrou desde que me confiou este trabalho, pela ajuda em todas as fases do mesmo, pela partilha de conhecimentos e pelas sugestões e críticas. Agradeço à Professora Maria Teresa Varanda Cidade e ao CINEMAT todo o apoio prestado e forma como fui recebido, permitindo enriquecer muito este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio necessário ao longo de todo o meu percurso académico.

Finalmente, agradeço à minha família e principalmente aos meus Pais, a força e os valores que me transmitiram, sem esquecer a Sara, pelo carinho e exemplo de trabalho. A eles lhes dedico esta dissertação.

Resumo

A sociedade dispõe hoje de um vasto património edificado que na maioria dos casos necessita de conservação para que continue a corresponder às necessidades e expectativas das comunidades. A alvenaria de pedra de múltiplos panos apresenta-se como a solução construtiva mais comum nos centros urbanos europeus. No entanto, a sua conservação requer na maioria das vezes intervenções de consolidação com vista à melhoria das suas características mecânicas e consequente integridade estrutural. A técnica de consolidação por injeção de *grouts* é uma das mais utilizadas neste tipo de solução construtiva. O trabalho aqui apresentado teve como objetivo contribuir para o conhecimento dos *grouts*, à base de cal hidráulica, para injeção em alvenarias antigas de três panos. Concretamente, sobre a influência da perda de água e da exsudação nas suas propriedades reológicas.

É sabido, que as propriedades no estado fresco dos *grouts* condicionam a resistência mecânica e durabilidade no estado sólido. Essas estão dependentes da capacidade de penetração nas fendas da alvenaria, preenchimento uniforme dos vazios e da manutenção da homogeneidade do *grout*, ao longo de todo o processo de reforço.

Neste sentido, definiu-se para a campanha experimental a realização de dois tipos de ensaios: fluidez-estabilidade e reométricos, de forma a quantificar os parâmetros definidos, genericamente, pelas propriedades em cima referidas. Durante os ensaios com o reómetro rotacional (pratos paralelos), investigou-se o fenómeno de escorregamento para três formulações de *grouts*. Foi possível correlacionar a ocorrência deste fenómeno com as condições de ensaio no reómetro (tensão e taxas de corte aplicadas e *gap*) e com a sua composição, nomeadamente o rácio entre água/ligante. Propôs-se, também, a colagem de uma lixa na superfície da geometria do reómetro, de forma a mitigar a subestimação dos parâmetros reológicos, introduzidas pelo escorregamento.

Termos chave: *grouts* de injeção, cal hidráulica natural, alvenarias de pedra, exsudação, reologia, escorregamento

Abstract

Today, society has a vast number of cultural heritage buildings at his disposal that, in most cases, require conservation to continue to fulfill the community's needs and expectations. The multiple leaf masonry presents itself as one of the most common constructive solutions in the European urban centers. However, it is frequent that the conservation of this kind of masonry claims consolidation interventions in order to enhance his mechanical properties and the following structural integrity. The main goal was to give a valuable contribution for the knowledge of hydraulic lime grouts, for injection in old three leaf masonries. Mainly, about the influence of bleeding and the loss of water on the grout's rheological properties.

It is known, that the grout's fresh properties define the mechanical resistance and durability in the hardened state. Those, rely on the ability to penetrate in the stone's cracks, even filling of voids and on the maintenance of the grout's homogeneity, during the whole reinforcement process.

Hereupon, an experimental campaign was planned for the realization of two kinds of tests: fluidity-stability and rheometric, so that the generically defined properties, mentioned above, would be properly quantified. During the tests, where the rotational rheometer was used (parallel plates as geometry), *wall slip* was investigated for three kinds of grout's formulation. It was possible to correlate the occurrence of this phenomenon, with the test conditions of the rheometer (yield stress, shear stress and the measuring gap) and with the grout's composition, namely the water to binder ratio. Finally, it was proposed that sand paper was glued to the smooth surface of the rheometer's geometry, to mitigate the underestimation of the grout's rheological properties, induced by wall slip.

Keywords: injection grouts, hydraulic lime, three leaf masonry, bleeding, rheology, wall slip

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Análise do conhecimento	5
2.1. Alvenaria de pedra antiga	5
2.1.1. <i>Caraterização de alvenarias antigas de pedra</i>	6
2.1.2. <i>Tipologias</i>	7
2.1.3. <i>Materiais constituintes das alvenarias</i>	9
2.1.4. <i>Fragilidades e anomalias das alvenarias de pedra de múltiplos panos</i>	11
2.2. Grouts para injeção em alvenarias	14
2.2.1. <i>Requisitos das caldas de injeção</i>	14
2.2.2. <i>Formulação dos grouts de injeção</i>	17
2.3. Noções gerais de reologia	20
2.3.1. <i>Propriedades reológicas</i>	21
2.3.2. <i>Escoamentos dependentes da solicitação</i>	23
2.3.3. <i>Escoamento dependente do tempo</i>	26
2.3.4. <i>Modelos matemáticos de interpretação do escoamento</i>	27
2.3.5. <i>Reometria rotacional</i>	28
2.3.6. <i>Fenómenos que propiciam erros de medição</i>	30
3. Métodos e procedimentos experimentais	35
3.1. Introdução	35
3.2. Materiais	35
3.2.1. <i>Cal hidráulica natural (NHL 5)</i>	35
3.2.2. <i>Superplastificante</i>	36
3.3. Constituição dos grouts	37
3.4. Procedimento de amassadura.....	38
3.5. Ensaio do cone de Marsh.....	39
3.6. Ensaio de espalhamento.....	40
3.7. Caraterização da estabilidade dos grouts.....	41
3.8. Ensaio de retenção de água Vs. Viscosidade aparente	43
3.9. Caraterização reológica dos grouts.....	46
4. Apresentação e discussão de resultados	51
4.1. Caraterização da fluidez, exsudação e retenção de água dos grouts.....	51
4.1.1. <i>Ensaio de Fluidez</i>	52
4.1.2. <i>Ensaio de estabilidade</i>	53
4.1.3. <i>Ensaio de retenção de água</i>	56

4.1.4. Viscosidade aparente Vs. Retenção de água.....	58
4.2. Análise do fenómeno de escorregamento nas medições reológicas dos <i>grouts</i>	59
4.2.1. Comportamento reológico do grout.....	59
4.2.2. Quantificação do escorregamento em função do gap, tensão de corte e rácio a/l.....	63
4.2.3. Alteração da rugosidade das geometrias.....	67
5. Conclusão e desenvolvimentos Futuros	77
5.1. Ensaio de fluidez e de espalhamento.....	77
5.2. Análise do fenómeno de escorregamento nas medições reológicas dos <i>grouts</i>	79
Bibliografia.....	83
ANEXO.....	89

Índice de Figuras

Figura 2.1- Exemplos de seções de alvenarias de pedra (três panos).....	7
Figura 2.2- Mecanismos de colapso possíveis em alvenarias de pedra de três panos, sem comunicação transversal, devido a ações fora do seu plano.....	12
Figura 2.3 - Modo de atuação da repulsão eletrostática	20
Figura 2.4 - Modo de atuação da repulsão eletro estática. Caraterístico dos PCE	20
Figura 2.5 - Modelo concetual de placas paralelas.....	22
Figura 2.6 - Comportamento de fluidos ideais. Esq.: Curvas de fluxo de diferentes fluidos; Dir.: Curvas de viscosidade de diferentes fluidos.....	24
Figura 2.7 - Comportamento de um fluido viscoplástico	26
Figura 2.8 - Curva de fluxo de um fluido que possui propriedades tixotrópicas (adaptado de: (Matos, 2013))	26
Figura 2.9 - Representação do modelo de medição reológica com pratos paralelos. Esq.: Pormenor de amostra de <i>grout</i> durante um ensaio; Dir.: Esquema do sistema de medição utilizado pelo reómetro .	29
Figura 2.10 - Efeito de parede junto à geometria do viscosímetro – esq.: $a/l=0,45$ e $SP=1\%$; centro: $a/l=0,5$ e $SP=1\%$; dir.: $a/l=0,55$ e $SP=1\%$	32
Figura 3.1 - Superplastificante usado na elaboração dos grouts, Chrysofluid AG.....	37
Figura 3.2 - Equipamento e material para preparação e ensaio de <i>grouts</i> – a) Balança nº1; b) Balança nº2; c) Misturadora; d) Provetas de plástico graduadas, esguicho e colher; e) Caixa plástica e peneiro	39
Figura 3.3 - Representação esquemática do ensaio do cone de Marsh.....	40
Figura 3.4 - Representação esquemática do ensaio de espalhamento	41
Figura 3.5 - Ensaio de estabilidade. Esq.: Equipamento e esquema de montagem do ensaio – a) tijolos; b) trave de madeira; c) <i>goblet</i> e <i>grout</i> ; d) balança nº2; Dir.: Esfera imersa em <i>grout</i> durante um ensaio	42

Figura 3.6 - Esquema de montagem do ensaio de retenção de água. Esq.: figura esquemática (falta a fonte); Dir.: montagem efetuada durante a campanha experimental	44
Figura 3.7 - Set up utilizado para o ensaio, em série, da capacidade de retenção de água e da evolução da viscosidade aparente	45
Figura 3.8 - Programação do ensaio em perfil de escada. Representa o desenvolvimento da taxa de corte ao longo do tempo de ensaio	47
Figura 3.9 - Reómetro rotacional utilizado na caracterização reológica das amostras de <i>grout</i>	48
Figura 3.10 - Geometria utilizada durante as medições reológicas e as duas superfícies consideradas: lisa e com lixa.....	49
Figura 4.1 - Registo dos tempos de escoamento no ensaio do cone de Marsh, em função do rácio a/l (gráfico de barras). Diâmetros de espalhamento em função do rácio a/l (gráfico de linha)	53
Figura 4.2 - Registo da perda de massa volúmica inicial (%) do <i>grout</i> , em função do tempo (ensaio de estabilidade)	55
Figura 4.3 - Quebra de massa volúmica inicial (%) do <i>grout</i> , em função dos diferentes rácios a/l e para os tempos parciais de: 10, 20, 30 e 60min.....	55
Figura 4.4 - Sequência da retirada da esfera metálica do <i>grout</i> mais pasroso ($a/l = 0,45$), que permite identificar a sua vizinhança rodeada por água e o vazio deixado no seu lugar	56
Figura 4.5 - Registos do tempos de retenção de água dos grouts submetidos a uma depressão, em função do rácio a/l e para três quantidades parciais (30, 45 e 60ml)	57
Figura 4.6 - Avaliação, para os diferentes rácios a/l , da variação da viscosidade aparente, em função da perda de água.....	59
Figura 4.7 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,5$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham modificado.....	60
Figura 4.8 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,45$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham modificado	60

Figura 4.9 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,45$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham e sem o troço inicial de maior variação dos valores de tensão	61
Figura 4.10 - Viscosidade plástica e tensão de cedência, descritos pela equação de Bingham modificada, para diferentes dosagens de água e gaps entre placas de medição	62
Figura 4.11 – Tensão de cedência e viscosidade plástica descritas pela equação de Bingham (todos os valores de tensão), para diferentes dosagens de água e para os vários gaps	63
Figura 4.12 - Tensão de cedência e viscosidade plástica descritas pela equação de Bingham (sem valores de tensão iniciais), para diferentes dosagens de água e para os vários gaps	63
Figura 4.13 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l = 0,45$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e $20Pa$)	64
Figura 4.14 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l = 0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e $20Pa$)	65
Figura 4.15 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l = 0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e $20Pa$)	65
Figura 4.16 - Diferenças entre mostras com rácio $a/l = 0,45$, depois de ensaiadas com um gap de $1mm$ (esq.) e $3mm$ (dir.)	66
Figura 4.17 - Diferenças entre mostras com rácio $a/l = 0,55$, depois de ensaiadas com um gap de $1mm$ (esq.) e $3mm$ (dir.)	67
Figura 4.18 - Alteração da rugosidade da geometria, com recurso à colagem de uma lixa (dir.) na face lisa (esq.)	68
Figura 4.19 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,45$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (80, 100 e $130Pa$)	69
Figura 4.20 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e $20Pa$)	70
Figura 4.21 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,55$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e $20Pa$)	70

Figura 4.22 - Curvas de escoamento para um grout de $a/l = 0,45$, representadas para os diferentes <i>gaps</i> de medição (geometria de face rugosa)	71
Figura 4.23 - Curvas de escoamento para um grout de $a/l = 0,5$, representadas para os diferentes <i>gaps</i> de medição (geometria de face rugosa)	71
Figura 4.24 - Curvas de escoamento para um grout de $a/l = 0,55$, representadas para os diferentes <i>gaps</i> de medição (geometria de face rugosa)	72
Figura 4.25 - Viscosidade aparente e tensão de cedência obtidos pela equação de Bingham modificada, para diferentes dosagens de água e para os vários <i>gaps</i> (geometria rugosa)	72
Figura 4.26 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com $a/l = 0,45$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa.....	73
Figura 4.27 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com $a/l = 0,5$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa.....	74
Figura 4.28 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com $a/l = 0,55$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa.....	74
Figura 4.29 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes a/l , obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado)	75
Figura 4.30 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes a/l , obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham parcial) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado).....	76
Figura 4.31 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes a/l , obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado).	76

Índice de Quadros

Quadro 2.1- Fachadas comuns em alvenarias de pedra.....	8
Quadro 2.2 - síntese dos requisitos essenciais a uma calda de injeção, apropriada para reforço de uma estrutura	16
Quadro 2.3 - Tipos de escoamento de acordo com o movimento descrito pelas partículas	21
Quadro 3.1 - Caraterísticas da cal hidráulica natural NHL 5, de acordo com o fornecedor.....	36
Quadro 3.2 - Caraterísticas do Superplastificante	36
Quadro 3.3 - Formulação dos grouts contemplando vários rácio a/l e as respetivas dosagens de SP ...	37

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

A – Unidade de área

F – Força Tangencial

h – Altura

V_s – Versus

V_s - Velocidade de escorregamento

SP – Superplastificante

PCE – Policarboxilato

SNF – Condensado de naftaleno formaldeído

Bl. – *Bleeding*

Crit. – Crítico(a)

NHL 5 – Cal hidráulica Natural

DEC/UNL - Departamento de engenharia civil da Universidade Nova de Lisboa

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia

EN - Norma Europeia (*European Norm*)

NP - Norma Portuguesa

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

XRF – *X-ray fluorescent spectroscopy* ou análise de fluorescência de raios X

S_A – Superfície específica

τ – Tensão de corte

τ_0 – Tensão de cedência

$\dot{\gamma}$ – Taxa de deformação por corte

η – Viscosidade

η_a – Viscosidade aparente

η_p – Viscosidade plástica

v – Velocidade

K – Coeficiente de consistência

n – Índice da “lei de potência”

w/b – *Water/binder*

a/l - Água/ligante

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Presentemente observa-se uma consideração pelo património edificado e uma vontade de preservar os centros históricos das nossas cidades, nunca antes testemunhada e partilhada pela população em geral. Este crescente interesse, poderá ser devido à consciencialização do valor histórico que os edifícios e monumentos antigos envergam, ou mesmo até, pelo receio de perdermos irremediavelmente a nossa identidade arquitetónica e cultural.

O panorama social e económico Português é propício à construção de luxo, por parte de investidores que pretendem atrair potenciais clientes, a maior parte destes estrangeiros, assim como alguma da elite de investidores nacionais. Existe portanto, a ideia de que a construção é dispendiosa, quase exclusiva dos privados, possuidores de capital para investimento em imóveis. Enquanto a reabilitação fica à responsabilidade do Estado ou das Câmaras Municipais e, mais recentemente ainda, das Direções Regionais de Cultura (previstas no decreto lei nº89/2012, de 25 de Maio) a quem compete a salvaguarda, valorização e a divulgação dos monumentos e do património cultural imóvel, abrangido na legislação.

Por outro lado, observou-se o decréscimo acentuado da atividade da construção civil, mais concretamente de construções novas, muito por causa da recente crise mundial, da qual Portugal não foi poupado, que forçou as principais empresas e construtoras a procurar novos mercados onde pudessem continuar a desenvolver os seus projetos, restando apenas alguns destes, com maior ou menor relevo, em território nacional.

Esta convergência de acontecimentos fomentou o crescimento da atividade de reabilitação em Portugal, auxiliada por programas desenvolvidos por algumas câmaras municipais, que impulsionaram este ramo da engenharia e ajudaram, de alguma forma, na renovação da forma de praticar construção e arquitetura, pois a engenharia de reabilitação e conservação requer uma abordagem e um conjunto de habilidades diferentes das que são empregues no *design* de construções novas (Lourenço, 2006).

Este momento deve ser aproveitado por todos os intervenientes, diretos ou indiretos, para dinamizar ainda mais o sector construtivo, introduzindo nova vida no mercado imobiliário e também nas nossas cidades, mudar alguns paradigmas e compreender o importante legado que é o passado como registo dos princípios construtivos e transmitir esses conhecimentos às gerações futuras. Um melhor conhecimento das técnicas tradicionais e uma nova pesquisa para as aplicar de uma forma modernizada, será uma das problemáticas de maior vulto nos trabalhos futuros, desenvolvido pelos autores neste campo de estudo (Penazzi, Valluzzi, Saisi, Binda e Modena, 2001).

A consolidação de alvenarias de pedra de múltiplos panos, compostas por elementos exteriores rígidos, que confinam um espaço preenchido por vários elementos de fraca qualidade, juntamente com a técnica de injeção de *grouts* para reforço das mesmas, conduzir-vos-á ao elemento central desta dissertação. Devido à alargada presença desta solução construtiva em centros históricos e monumentos de toda a Europa, a injeção de *grouts* é um procedimento comum e bastante eficaz nas operações de consolidação atuais. O processo de consolidação é feito através da introdução deste material fluido – neste caso, à base de cal hidráulica - sob pressão ou por gravidade, na folha central das alvenarias. O objetivo é o preenchimento eficaz dos vazios e fendas, originados pela desagregação do material do núcleo e pelo envelhecimento natural da alvenaria. A operação, se bem executada, através do restabelecimento dos elos de ligação entre os três panos, devolverá o comportamento monolítico à alvenaria e melhorará a sua resistência mecânica. O grau de sucesso depende essencialmente da capacidade de penetração do *grout* nos vazios. Desta forma, é necessário avaliar o meio onde o *grout* será inserido, assim como, controlar as suas propriedades no estado fresco, tais como a tensão de cedência, a viscosidade plástica, exsudação e retenção de água, que podem condicionar o seu avanço, mantendo, ao mesmo tempo, homogeneidade suficiente para poder conferir resistência mecânica à alvenaria. Aqui surge o estudo das propriedades reológicas dos *grouts*. E, simultaneamente, o estudo do fenómeno de escorregamento, que durante as medições reológicas, condiciona a sua correta avaliação. Vários autores, como Banfil (2006), Nehdi (2004) e Saak (2001), mostraram em estudos anteriores com betão e pastas de cimento, que o escorregamento tem um importante papel durante as medições reológicas, levando à subestimação do valor da tensão de cedência e de falsos valores de viscosidade (Baltazar, 2015).

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem o objetivo de contribuir para o conhecimento das propriedades reológicas, que têm um importante papel na formulação e caracterização de *grouts*, destinados a operações de injeção em alvenarias antigas, nomeadamente alvenarias de três panos.

Os ensaios e medições reológicas, levadas a cabo durante a realização das campanhas experimentais, tiveram como principal orientação:

- Estabelecer um padrão de influência da perda de água e da exsudação – migração de água da mistura para a superfície – nas propriedades reológicas e na estabilidade dos *grouts* no estado fresco;
- Quantificar a influência do escorregamento (*Wall Slip/Splippage*) nas propriedades reológicas de *grouts* de injeção, com recurso a um reómetro rotacional;

- Verificando a ocorrência de *Wall Slip*, procurar inibir o fenómeno através da modificação da rugosidade da geometria do reómetro e apresentar os melhoramentos obtidos.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação desenvolve-se ao longo de cinco capítulos. No primeiro capítulo é feito um enquadramento dos temas abordados e são estabelecidos os objetivos a alcançar com este trabalho. No segundo capítulo apresenta-se uma metodologia de caracterização dos suportes em estudo e dos materiais que os constituem e que serão alvo de intervenções como a injeção de *grouts*. Sintetiza-se, também, o estado do conhecimento sobre os *grouts* de injeção, proporcionando uma melhor perceção destes materiais, dos seus constituintes e do seu processo de formulação.

O conhecimento das propriedades reológicas é fundamental para a caracterização dos *grouts* no estado fresco, assim, como na quantificação em termos físicos de algumas propriedades equivalentes, às quais, normalmente, nos referimos de forma genérica: a trabalhabilidade, a fluidez e a injetabilidade. Neste sentido, ainda no segundo capítulo, são descritos os métodos de averiguação dos parâmetros reológicos, os princípios seguidos na sua medição e os modelos que descrevem o escoamento dos *grouts*. No terceiro capítulo, explana-se a metodologia seguida ao longo de toda a campanha experimental. É feita uma descrição de todos os procedimentos experimentais, uma caracterização detalhada de todos os materiais e equipamentos utilizados, assim como o cuidado e o rigor tidos na sua utilização. No quarto capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante os ensaios programados.

Finalmente, as conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros são apresentados no quinto e último capítulo.

Refere-se ainda, adicionalmente, a apresentação em anexo de tabelas auxiliares com os resultados obtidos nas medições reológicas, que permitiram construir as curvas de escoamento dos *grouts* e quantificar a velocidade de escorregamento. Assim como, uma disseminação preliminar de resultados, realizada no âmbito da Conferência Ibérica sobre Reologia (edição de 2015), que é organizada em conjunto pela Sociedade portuguesa de Reologia (SPR) e pelo Grupo Espanhol de Reologia (GER). Aí, é feita uma primeira abordagem crítica aos resultados e donde se retiraram algumas conclusões que antecedem os restantes ensaios reométricos, efetuados com recurso a uma geometria de superfície rugosa.

2. Análise do conhecimento

2.1. Alvenaria de pedra antiga

A análise feita no presente capítulo centrar-se-á nas construções de caráter histórico, que pela sua composição e características estruturais, estão contextualizadas na temática da presente dissertação. De uma forma geral, esta escolha baseia-se no tipo de materiais utilizados (blocos de pedra ordinária), na tipologia de construção e secção transversal (três panos), no tipo de argamassas e nos rebocos. Entre estas, encontram-se as estruturas consideradas imutáveis, uma vez que, o propósito com que foram erigidas, como por exemplo: proteger, abastecer a cidade de água ou servir como local de culto, atualmente já não se aplica, mas o seu valor patrimonial exige que se mantenha a sua aparência original, estabilidade estrutural e se promova a sua durabilidade. Salvo algumas exceções, esta análise não pretende visar os edifícios habitacionais, apesar de muitos destes necessitarem, de forma evidente, desde simples manutenções a extensos trabalhos de consolidação.

São várias as técnicas clássicas de consolidação, contudo, os *grouts* especializados para injeção, assim como as tecnologias essenciais à sua aplicação, têm vindo a ser desenvolvidas desde 1990, para permitir uma consolidação apropriada das alvenarias, com respeito pela autenticidade e pelo seu valor patrimonial no contexto do monumento, como é requerido pela Carta de Veneza (Gemert, Ignoul, Brosens e Toumbakari, 2015).

No grupo de suportes elegíveis para aplicação desta técnica, as estruturas de panos múltiplos de alvenaria de pedra são as mais peculiares; o seu comportamento sob ação sísmica e a sua compatibilidade com técnicas de reparação ainda requerem mais conhecimento e compreensão; não podem ser, sequer, comparadas às alvenarias de tijolo ou estruturas de alvenaria de pedras regulares (Penazzi et al., 2001).

Neste âmbito, a consolidação de edifícios tem um papel de grande preponderância, pois é necessário um grande conhecimento do historial das alvenarias, por vezes com cariz quase arqueológico, para tentar compreender a origem das anomalias, os materiais de construção utilizados e aqueles que possam ter sido substituídos ao longo da sua história. E, estar apto a recomendar que não se tome qualquer ação, pode significar muito mais trabalho de investigação e, consequentemente, mais custo para o engenheiro, do que recomendar uma qualquer intervenção profunda (Lourenço, Ramos, Vasconcelos e Peña, 2008).

Assim, procurou-se uma metodologia de caracterização dos suportes e dos materiais que os constituem, que serão alvo de intervenções com o cariz acima referido, de forma a estabelecer um

conjunto coerente das características que poderão levar à escolha da técnica de injeção de *grouts* e, mais importante até, condicionar o sucesso dessa operação.

2.1.1. Caracterização de alvenarias antigas de pedra

Ao se imaginar uma estrutura cuja sua idade e época de construção lhe conferem um estatuto histórico e de herança patrimonial, cria-se a imagem de uma igreja, de uma muralha ou de um coliseu. No fundo, tenta imaginar-se a estrutura mais antiga possível, onde os denominadores comuns são os grandes blocos de pedra ordinária que as constituem, assentes uns sobre os outros de forma mais ou menos criteriosa, com ou sem argamassa a uni-los, formando o material das juntas. Mas, as alvenarias ordinárias de pedra dos edifícios históricos são estruturas muito heterogêneas compostas por pedras, materiais cerâmicos e argamassas de cal, apresentando em geral, espessuras, peso e rigidez elevadas, o que lhes confere boa resistência à compressão, mas reduzidos valores de resistência ao corte, à flexão e à tração (Gonçalves, 2013).

No caso das alvenarias de três panos, a sua seção é composta por duas folhas resistentes externas e um espaço interior, ocupado por pequenas pedras, areia, argamassa e outro tipo de materiais desagregados. A falta de coesão entre os diferentes elementos, a existência de vazios, fendas e uma conexão deficiente entre os panos exteriores, conduz a um comportamento não monolítico da alvenaria (Bras e Henriques, 2012).

Uma forma não destrutiva de conhecer o comportamento estrutural da alvenaria poderá ser através da observação visual, ou fotográfica de vários elementos específicos. Binda, nos seus trabalhos de investigação, aprofundou uma metodologia de avaliação da porosidade global da estrutura, baseada na observação das seções transversais das alvenarias fotografadas à escala natural. Nestas, além de serem quantificadas as áreas de vazios (muito importante para os trabalhos que envolvam a injeção de *grouts*), podem ainda ser conhecidos outros fatores: espessura da parede (geometria), número de panos e tipo de ligação entre eles e o tipo de material de enchimento (Binda e Saisi, 2002).

Há situações nas quais, pelo estado de conservação em que a estrutura se encontra, não é possível uma inspeção visual à sua seção transversal. Também, devido ao seu valor histórico, por razões óbvias, não é sequer ponderada uma avaliação por métodos destrutivos. As alternativas passam por utilizar ensaios ultrassónicos para a deteção de elementos estruturais ocultos, descontinuidades no núcleo, heterogeneidades no material e avaliar a extensão dos danos provocados pelas fissuras. Pode ainda recorrer-se a ensaios ligeiramente destrutivos, recolhendo amostras (pedra, argamassa ou material do interior da alvenaria) para análise laboratorial, numa quantidade tão pequena que não altere a composição inicial da estrutura. Assim, poderá ser conhecido o teor em humidade, o nível de ascensão de água por capilaridade e o grau de degradação superficial.

2.1.2. Tipologias

Segundo Mascarenhas (2003), a técnica de construção de paredes com pedra divide-se em dois tipos: cantaria e alvenaria. A diferença entre os dois prende-se com o uso de argamassas. Enquanto, o primeiro tipo de trabalho é feito com junta seca (não se faz o uso de argamassa para o assentamento das pedras), no segundo tipo, as pedras já são assentes com algum tipo de ligante. Luso (2012), citando vários autores, distingue estas técnicas com mais rigor, sendo as diferenças entre elas subtis, mas essenciais no diagnóstico criterioso exigido neste âmbito.

As alvenarias podem ser classificadas ainda quanto ao seu tipo de secção, nomeadamente, tendo em conta o número de panos que apresentam na sua constituição. Tendo já sido apresentada uma definição anteriormente, considerando tais características, apresentam-se na figura 2.1 alguns dos tipos de secções transversais que podem e ser encontradas:

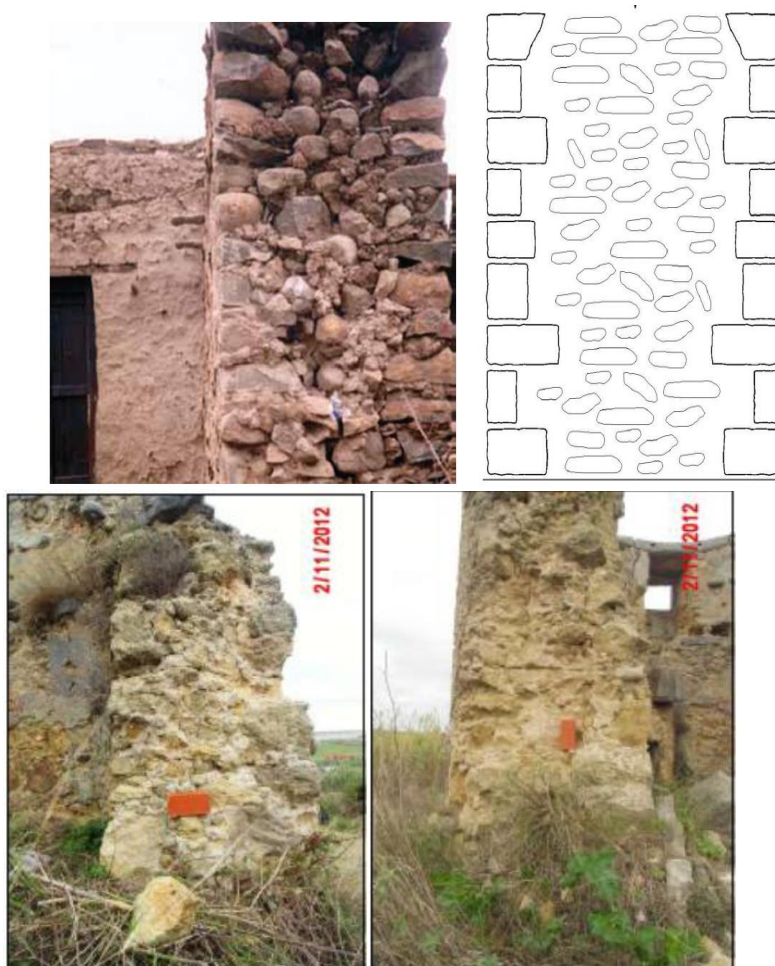
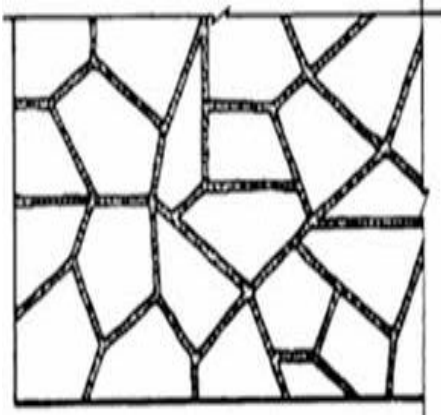
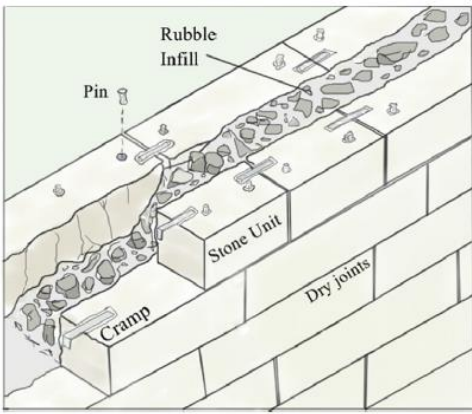



Figura 2.1- Exemplos de secções de alvenarias de pedra (três panos) (adaptado de: (Van Gemert et al., 2015) e (Rosa,2013))

No quadro 2.1 podem observar-se as técnicas construtivas mais comuns, referentes à tipologia dos alçados e as suas principais características:

Quadro 2.1- Fachadas comuns em alvenarias de pedra. Cima: alvenaria de pedra aparelhada (slides IST - Professores: Branco, Brito, Ferreira e Flores); centro: alvenaria de pedra regular (Demir e Ilki, 2014); baixo: alvenaria ordinária (Roseiro, 2012)

Designação da técnica de construção	Aspetto	Caraterísticas
<i>Alvenaria de pedra aparelhada/aparelho rústico ou Alvenaria mista</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Pedras irregulares (xisto e granito) • Assentes em argamassa • Pedras rijas e aparelhadas, numa face, formam os paramentos • Aspetto de polígono irregular fica à vista
<i>Alvenaria de pedra aparelhada/aparelho regular tosco ou parede cantaria</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Pedras retangulares (geralmente, granito de grandes dimensões) • Assentamento com, ou sem argamassa (junta seca – <i>dry joints</i> em Inglês) • Sobrepostas e justapostas
<i>Alvenaria ordinária</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Pedra irregular assente em argamassa • Técnica menos cuidada (rapidez na execução) • Normalmente revestida por argamassa • Necessidade de travamento (encasque)

2.1.3. Materiais constituintes das alvenarias

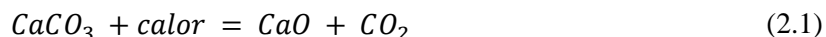
- **Argamassa**

Apesar de ser um elemento de pouco relevo neste tipo de alvenarias, a argamassa é um elemento de ligação essencial. Obtém-se juntando água ao ligante, aos agregados (finos ou grossos) e contendo, por vezes, adições. A sua função é definida em concordância com a sua localização na estrutura, podendo ser designada como: argamassa de assentamento, de refechamento de juntas, de ligação entre os elementos soltos do núcleo e de elemento protetor ou decorativo (se utilizada como reboco).

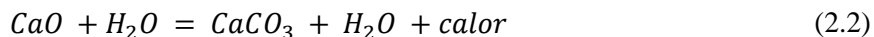
Na Europa, desde tempos antigos até ao início do séc. XIX, as argamassas eram geralmente de cais puras (também designadas por não hidráulicas, ou cais aéreas, pois necessitavam da presença de ar para carbonatar e endurecer), de cais hidráulicas naturais ou pozolânicas (endureciam se submersas em água) (Martínez, Castillo, Martínez, e Castellote, 2013).

O termo cal, que designa o ligante na constituição das argamassas, refere-se ao óxido de cálcio (CaO – cal viva) formado a partir da cozedura de calcários puros – carbonato de cálcio, $CaCO_3$; ou de carbonato de cálcio e magnésio - que, depois de hidratado, resulta num composto designado por hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ – cal apagada). A decomposição por ação da temperatura designa-se calcinação e, com a aspersão ou imersão em água, dá-se o processo de extinção da cal.

A aproximadamente $900^\circ C$ dá-se a reação de calcinação, que é endotérmica:



Em contrapartida, a reação química de extinção da cal viva é exotérmica expansiva:



A cal aérea pode ser classificada como cálcica gorda, quando se obtém a partir de calcários com percentagem igual ou superior a 99% de carbonatos, ou cálcica magra, quando contém 1% a 5% de argila ou outras impurezas. A cal aérea pode ainda ser magnesiânica, quando o teor em óxido de magnésio é superior a 20% (Rosário Veiga e Paulina Faria, 1990).

A cal hidráulica natural obtém-se por cozedura dos calcários margosos (com teores de argila entre 5% e 20%) e das margas calcárias (com teor de argila entre 20% e 40%). Para temperaturas entre $1200^\circ C$ e $1500^\circ C$, dá-se a formação do óxido de cálcio e a combinação de parte do cálcio com sílica e alumina, formando silicatos e aluminatos (Rosário Veiga e Paulina Faria, 1990).

Normalmente, as cais hidráulicas têm baixas tensões de rotura devido a uma cozedura a temperatura insuficiente. O que, à partida, poderia ser visto como uma desvantagem para a durabilidade da estrutura, acaba por criar condições ótimas de assentamento dos blocos de pedra, permitindo uma transmissão uniforme da carga nas juntas.

Forma-se, assim, um importante sistema de juntas de dilatação, suficientemente resistente e elástico para absorver tensões e movimentos diferenciais que se podem gerar no interior da parede. Graças ao seu comportamento elástico, as argamassas absorvem contrações e expansões produzidas por variações térmicas, sem fissurar (Luso, 2012).

De forma a completar as características físicas e mecânicas das argamassas de cal, pode ainda referir-se que estas apresentam uma elevada permeabilidade ao vapor de água, alta absorção capilar e baixa resistência aos ciclos gelo/degelo. É importante sublinhar, que a alta capacidade de absorção destas argamassas, pode provocar retração ou segregação nos *grouts* de injeção (Binda, Modena, Baronio e Abbaneo, 1997).

- **Agregados e adições**

A par da cal, a areia, o barro e o gesso constituíam os materiais mais comuns e de eleição, para a elaboração das argamassas das alvenarias de pedra antigas. Consoante as preocupações construtivas de cada civilização, como a durabilidade e a proteção, por exemplo contra a água, podem ser encontrados outros materiais de propriedades conhecidas na sua constituição (hidráulicas ou impermeáveis): pozolanas, pó de tijolo, materiais orgânicos como o sebo e borra de azeite.

As civilizações Grega e Romana descobriram que a calcinação de calcários margosos, como já foi referido, com concentrações de alumino silicatos (argilas), rendia um material ligante que endurecia debaixo de água e que melhorava as propriedades mecânicas da parede. As cais hidráulicas artificiais, por sua vez, descobertas pelos Fenícios e aperfeiçoadas por Gregos e Romanos, eram obtidas misturando a cal com material pozolânico, retirado da cidade de Puzzoli, localizada nas imediações do Vesúvio em Itália. Este material pozolânico possuía alto teor de material reativo, a sílica e alumina. Fundamentalmente, as reações pozolânicas são condicionadas pelas quantidades disponíveis destes dois componentes (Matias, Faria e Torres, 2014).

Quando combinados com $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio) na presença de água, geram novos produtos, principalmente silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, com propriedades ligantes e cimentícias superiores às das argamassas anteriores. (Rodríguez-Navarro, 2012)

Segundo Theodoridou (2013), podem encontrar-se dois tipos de pozolana:

- *Pozolana natural* – a de origem vulcânica e utilizada há milhares de anos na produção de argamassas;

- *Pozolana artificial* – Produzidas a partir de materiais naturais, tais como argila, após tratamento a altas temperaturas. Os tijolos finamente esmagados, na forma de fragmentos ou pó, são um exemplo típico de pozolanas artificiais, mas a natureza deste material de adição, é considerada hidráulica com base nas possíveis reações com o hidróxido de cálcio, referidas anteriormente, e a subsequente formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, durante o processo de solidificação.

É importante relembrar que estes constituintes, não só têm influência nas características mecânicas da alvenaria, mas também nas suas propriedades físicas e químicas. Por isso, é de extrema importância ponderar quais os materiais usados na sua conservação, sob pena de interferir, de forma irreversível, no funcionamento de um sistema construtivo de características muito peculiares.

- **Pedra**

É o material eleito para compor os panos exteriores das alvenarias, devido à sua durabilidade, beleza estética e pelo facto de poderem ser desmontadas com relativa facilidade, para reutilização noutras construções. A sua utilização é muito versátil, havendo uma grande variedade de formas e tamanhos (mais ou menos regulares). O local da estrutura onde são empregues depende das suas características físicas e mecânicas. Em território nacional, a escolha do tipo de pedra a utilizar era feita em função da localização geográfica, da disponibilidade de recursos, da época e do tipo de arte construtiva. No norte do país, especificamente no Minho e Douro Litoral, é usual a presença de granito, o xisto em Trás-os-Montes e Beiras e o calcário na zona de Lisboa e Alentejo. Podem encontrar-se algumas exceções, no caso de monumentos ou em edifícios senhoriais, onde o fator económico permitia trazer pedra de qualidade, caso não estivesse disponível nas proximidades.

Tal como todos os materiais, este também sucumbe ao fator tempo, aos ataques ambientais e ao desgaste de utilização, surgindo anomalias estéticas e estruturais, como se poderá verificar no ponto seguinte.

2.1.4. Fragilidades e anomalias das alvenarias de pedra de múltiplos panos

As alvenarias de panos múltiplos são particularmente suscetíveis a tensões de corte no seu plano, devido à baixa resistência que apresentam a este tipo de solicitações. Adicionalmente, se a qualidade do pano interior, comparativamente à dos panos exteriores, for pobre e se não existirem elementos transversais de ligação entre panos, irão ocorrer, com certeza, colapsos fora do plano da alvenaria e descolamentos (Silva, Dalla Benetta, Da Porto e Modena, 2014).

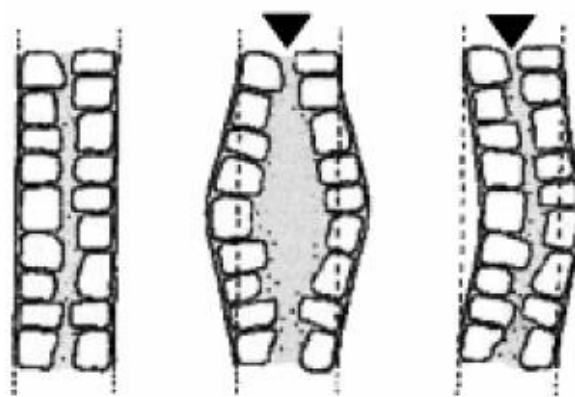


Figura 2.2- Mecanismos de colapso possíveis em alvenarias de pedra de três panos, sem comunicação transversal, devido a ações fora do seu plano (adaptado de (Silva, 2012))

A estas vulnerabilidades estruturais juntam-se fatores como o tempo, as ações químicas e biológicas e a falta de manutenção e conservação. Tendo presente que um diagnóstico correto é essencial para averiguar a origem de cada patologia e viabilizar a injeção com *grouts*, sintetiza-se neste ponto as principais razões que possam conduzir ao reforço da estrutura, recorrendo a esta técnica.

- **Fendilhação**

É talvez a anomalia mais vulgar nas alvenarias de três panos, devido a uma baixa resistência às forças de tração. Surgem com frequência junto a zonas onde se concentram tensões: aberturas, nos cantos ou em ligações com outras paredes ortogonais. Os padrões deixados pelas fendas permitem, a maior parte das vezes, identificar os movimentos que os provocam. Alguns exemplos são: assentamentos diferenciais na fundação, alinhamento deficiente nas ligações das paredes, vibrações, choques e heterogeneidades no material que as constitui. Habitualmente não se tem em conta o peso próprio destas estruturas, mas o seu tamanho e o tempo que estiveram sujeitas a cargas cíclicas, como o vento e as ações térmicas, faz com que a fendilhação seja, também, amplificada por este fator. A presença de água agrava a extensão das fissuras, em função da qualidade dos materiais e do tipo de construção.

- **Desagregação**

Normalmente, nem todas as fendas representam um risco de dano estrutural para o edifício, mas o seu aumento pode levar à ocorrência de desagregação. Além das causas mencionadas acima, a presença de pedras brandas em conjunto com a exposição à poluição, a movimentos de ascensão capilar, à água da chuva e a atos de vandalismo, agravam ainda mais o estado de deterioração dos materiais. Esta situação leva a que as estruturas deixem, progressivamente, de suportar tensões de compressão e de corte.

É importante destacar, que o desgaste das pedras não se deve somente aos fatores químicos e físicos mencionados, mas também aos agentes biológicos. Estudos sobre algas concluíram que, além de mancharem e descolorarem as pedras, promovem o seu enfraquecimento, através da penetração dos filamentos nos poros e mobilizam calcificação e ataques ácidos. Isto provoca alterações ao nível da topografia mineral (especialmente nos calcários devido aos carbonatos e nos granitos devido aos feldspatos), onde chegam a ser registadas subidas até duas unidades de pH (Welton, Cuthbert, McLean, Hursthouse e Hughes, 2003).

- **Anomalias resultantes da ação da água**

De todos os agentes responsáveis pelo desgaste das estruturas, a água é talvez o que mais facilmente se identifica, devido às marcas características que deixa à sua passagem. Esta penetra nos pontos mais fracos, tais como: fendas, juntas de assentamento e vazios. Ou ascende por capilaridade, dissolvendo sais presentes no solo ou na estrutura e arrasta os elementos constituintes mais finos, ao longo do seu trajeto. Estes movimentos fazem com que o arranjo do enchimento interno se altere, alargando a rede de vazios e proporcionando um aparecimento de sais à superfície ou até zonas internas do reboco, onde as condições de humidade e temperatura provocam a sua cristalização (com danos colaterais para a alvenaria).

Em alguns casos, as argamassas estudadas em ambiente marítimo, com um tremendo índice de penetração de sais, apresentam atualmente uma durabilidade assinalável. Este fato pode estar relacionado com a combinação de sais ao nível dos silicatos de cálcio e dos compostos de alumínio e de cálcio, formados em argamassas antigas com a presença de água. Também a presença de etringite¹ nos poros da deformável argamassa de cal, parece evitar os usuais efeitos destrutivos, melhorando a sua resistência mecânica (Borges, Santos Silva, e Veiga, 2014).

¹ Etringite – A sua formação pode ser atribuída à reação entre os sulfatos e os aluminatos de cálcio, gerados nas reações pozolânicas entre a cal e os minerais reativos do agregado (areia).

2.2. Grouts para injeção em alvenarias

Dissecando as inúmeras definições existentes na bibliografia disponível sobre o tema, pode afirmar-se que, essencialmente, o *grout* é uma suspensão concentrada de partículas de ligante em água e, na maior parte dos casos, adjuvantes e/ou adições, tendo como finalidade a injeção em alvenarias de panos múltiplos. Esta aplicação tem como objetivo aumentar a compactação dessas alvenarias, criar ligações entre os panos interiores e exteriores, devolver o comportamento monolítico à alvenaria e aumentar a resistência a cargas permanentes (Baltazar, Henriques, Jorne e Cidade, 2013).

Para o efeito é necessário que o *grout* preencha os vazios, sejam estes de pequena ou grande dimensão, de modo a tornar o interior da alvenaria um meio contínuo. Por mais simples que aparente ser a sua definição, a formulação de *grouts* (*grout design*) e a aplicação das técnicas de injeção, estão longe de serem tão lineares. Além das características muito peculiares das alvenarias de panos múltiplos, há que garantir previamente que as misturas satisfazem uma série de requisitos essenciais ao sucesso de toda a operação, pois trata-se de um processo irreversível, na medida em que não será possível recolher o *grout* depois de injetado.

Sendo uma das técnicas de aplicação mais comum na reabilitação e conservação do património cultural edificado, é normal que surjam e existam no mercado várias soluções de *grouts* pré doseados, tais como suspensões à base de polímeros, cimentícias e de cais aéreas/hidráulicas. Todas estas soluções têm vindo a ser, ao longo dos últimos anos, objeto de estudo em laboratório, assim como *in situ*, por parte dos investigadores, devido à falta de conhecimento e à complexidade que caracteriza a prescrição da dosagem de um *grout* de cal hidráulica para injeção. Além disso, em alguns desses produtos, a informação disponibilizada é limitada pelo que os *grouts* fluidos têm sido aplicados sem conhecimento total das suas propriedades (Lourenço, 2014).

Neste capítulo, sintetiza-se o estado do conhecimento, sustentado pelo esforço conjunto que tem sido levado a cabo pela interação entre a prática *in situ* e a investigação científica. Pretende-se, assim, proporcionar uma melhor perceção dos *grouts* e do processo da sua formulação.

2.2.1. Requisitos das caldas de injeção

Para os vários tipos de misturas interessa que, de forma geral e numa primeira abordagem, satisfaçam os seguintes requisitos (Adami e Vintzileou, 2008):

- Compatibilidade física e química com os materiais que constituem os suportes;
- Eficiência, do ponto de vista de resistência mecânica, i.e. módulo de elasticidade equivalente ao da alvenaria.

Depois de estabelecidos os padrões necessários à compatibilidade - do ponto de vista da recetibilidade dos materiais antigos aos novos que serão introduzidos - à introdução das novas propriedades mecânicas, em conjunto com os estudos prévios que permitam avaliar o estado de degradação da estrutura, no que respeita, pelo menos, à profundidade das cavidades, fissuras e comunicação dos poros, é, então, desbloqueada uma nova fase de averiguação das propriedades essenciais a uma injeção de sucesso. Assim sendo, definem-se de seguida, de acordo com Luso (2012), as propriedades mais importantes a ter em conta aquando da formulação de *grouts* de injeção, complementadas com contribuições de diversos autores:

Fluidez – capacidade de permanecer no estado fluido por tempo suficiente, enquanto percorre o interior da alvenaria e se difunde de forma homogênea nas cavidades (Valluzi, 2000). A fluidez depende fundamentalmente da distribuição granulométrica dos grãos, da natureza, forma e superfície específica das partículas, da percentagem de água de amassadura e do método de mistura da calda (Vintzileou, 2006). Isto significa que a simples junção de ligante e água, provavelmente será insuficiente para uma performance desejada por parte do *grout* (Baltazar, Henriques, Jorne e Cidade, 2014).

Estabilidade – capacidade de permanecer homogênea, ou seja, exibir as mesmas propriedades (ou muito semelhantes) durante o processo de introdução na alvenaria e, numa fase posterior, em repouso até ao seu endurecimento. A estabilidade de um *grout* está dependente da velocidade a que se prepara a mistura, do tempo que esta demora e, ainda, com o momento de adição e o tipo de adjuvante adicionado. Está, ainda, relacionada com a capacidade de retenção de água da mistura.

A retenção de água pode ser melhorada pela introdução de finos, como cinzas volantes e sílica de fumo. Estes materiais podem ajudar no controlo da segregação e exsudação. Pode-se afirmar que conseguir a estabilidade na conceção de um *grout* de injeção constitui um objetivo fundamental, pois constitui a condição para a qual se obtêm as mesmas propriedades em todos os locais no seio do material, quando este passa do estado fresco para o estado endurecido (Luso, 2012).

Exsudação – ressurgimento da água de mistura à superfície do *grout*, com a formação de uma lâmina de água. Está essencialmente ligada com a relação água/ligante, com a concentração de partículas e a dispersão granulométrica do ligante.

Segregação – Tendência para os materiais que compõem o *grout*, se separarem por camadas bem definidas. Depende da forma, dimensão e densidade das partículas e também da quantidade de água utilizada. Segundo Laefer *et al.* (1996) a segregação depende das características do *grout* e pode ser influenciada pela relação a/l e pela quantidade de absorção de água do suporte. Se há segregação, a penetração da mistura é difícil e a resistência final é alterada.

Injetabilidade – Eklund and Stille afirmam que a habilidade de um *grout* em penetrar nas cavidades, canais e porosidades do material, depende de dois aspetos: reologia e tendência de filtragem. A tendência de filtragem é a capacidade que um *grout* tem de prevenir obstruções nos poros de menor dimensão, evitando que os grãos de ligante entupam o caminho de escoamento e impeçam uma penetração mais profunda (Bras e Henriques, 2012).

No quadro seguinte, estão indicados resumidamente os requisitos essenciais, categorizados de modo a facilitar a compreensão de cada um deles e observar, de forma clara, quais os pontos em comum:

Quadro 2.2 - síntese dos requisitos essenciais a uma calda de injeção, apropriada para reforço de uma estrutura (adaptado de (Binda et al., 1997) (Luso, 2012))

Requisitos Reológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma; - Ausência de segregação; - A exsudação deve ser mínima, para diminuir a presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido;
Requisitos Químicos	<ul style="list-style-type: none"> - Deverá ter características químicas estáveis no tempo, ou seja, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis; - Deverá ser resistente aos sais de sulfato, de modo a evitar formação de produtos expansivos (por ex.: etringite) e eflorescências; - Teor de álcalis deverá ser mínimo;
Requisitos Físicos	<ul style="list-style-type: none"> - O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; - Pretende-se que a calda tenha uma retração baixa; - As propriedades higroscópicas deverão ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de água
Requisitos Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> - As características de resistência mecânica e, essencialmente, de rigidez deverão ser similares às da argamassa original, ou apenas ligeiramente superiores;

Pode retirar-se da análise do quadro anterior, que um dos requisitos de maior importância é a aderência do *grout* ao suporte. Como foi referenciado por Adami e Vintzileou (2008), testes mecânicos em alvenarias de pedra ordinária de três panos, umas injetadas com *grout* e outras não, provaram que um dos parâmetros chave das propriedades mecânicas do *grout* não é a resistência à compressão. Como foi sugerido por Toumbakari (2002), a eficiência do processo de injeção depende nas propriedades de ligação da interface *grout*-materiais *in situ*.

Estas propriedades necessitam, forçosamente, de dados concretos de forma a se quantificarem os valores que traduzem uma ligação sólida destas interfaces, o que desviaria o assunto abordado nesta

dissertação, uma vez que os ensaios propostos para a averiguação de uma boa aderência, são realizados em provetes e este estudo incide unicamente nas propriedades de *grouts* no estado fresco.

Sabe-se que a ligação química (*chemical bond*) é mobilizada quando o escorregamento (*slip/slippage*) na interface *grout*-suporte é praticamente zero, decrescendo para valores quase nulos quando este ocorre. Existem ainda outros fatores que podem influenciar a aderência do *grout*, destacando-se a mineralogia do substrato (estrutura interna da alvenaria), a porosidade da sua superfície, o tipo de ligante e a presença de pozolanas (sílica de fumo, por exemplo). É do conhecimento geral que a ligação entre o *grout* e a alvenaria ou agregados, respetivamente, é devida também à ligação do tipo mecânica, que depende igualmente das características do substrato (Adami e Vintzileou, 2008).

Assim, a escolha do *grout* de acordo com a tipologia e a textura da parede, assume particular importância, uma vez que pode determinar se o reforço é ou não eficaz. As alvenarias de três panos são indubitavelmente mais adequadas a este tipo de operação, quando comparadas com as de dois panos, composta por grandes blocos de pedra aparelhada (Corradi, Borri e Vignoli, 2002).

2.2.2. Formulação dos *grouts* de injeção

Como referido anteriormente, os *grouts* de injeção podem ser formulados *in situ* ou adquiridos com um pré-doseamento. A escolha de uma destas duas opções, recai no grau de controlo que se pretende obter sobre os requisitos e comportamento dos *grouts* durante a injeção. Depende, ainda, da disponibilidade de recursos, do conhecimento da injetabilidade da alvenaria e da sua compatibilidade com os materiais que serão adicionados. Os *grouts* preparados em obra podem ser constituídos por um ou mais ligantes (neste caso a cal hidráulica), água e adições, ou adjuvantes (introdutores de ar, fluidificantes e redutores de água/superplastificantes). Por outro lado, nos *grouts* pré-doseados em fábrica, além de se encontrarem os constituintes já indicados em várias proporções, é comum serem incluídas, em alternativa, misturas orgânicas espessantes (*celulose ether, starch gums, etc.*). Adicionalmente, estes adjuvantes proporcionam outros efeitos positivos além da retenção de água, tais como: a estabilização do ar introduzido, que é muito importante no processo de bombagem. Contudo, podem apresentar efeitos indesejáveis como o retardamento da hidratação ou um espessamento excessivo (Cappellari, Daubresse e Chaouche, 2013).

- **Adições**

Em alternativa aos *grouts* pré-doseados, podem recorrer-se aos seguintes tipos de adições, que vão de encontro às propriedades pretendidas para o *grout* em questão:

- Pozolanas: metacaulino, sílica de fumo e cinzas volantes. Estes só podem ser adicionados em quantidades que não ponham em causa as propriedades reológicas necessárias a uma boa injeção. No caso da sílica de fumo, recomendam-se adições em quantidades inferiores a 6% (relativamente à massa de ligante), sob pena de aumentar drasticamente a tensão de cedência e comprometer a capacidade de penetração nos vazios;

- fillers: pó de pedra calcária, em quantidades não superiores a 6% (relativamente à massa de ligante).

- **Rácio de água/ligante (em inglês w/b)**

A relação entre a água/ligante, devido à multiplicidade de situações de aplicação de *grouts* em pontes, edifícios históricos e outros elementos arquitetónicos, construídos com materiais diferentes, com níveis de degradação diferentes e inseridos em estruturas com características particulares, faz com que cada situação apresente dificuldades próprias e não se possa, à priori, padronizar o modo de intervenção (Borralho, 2013).

Na bibliografia, os rácios de caldas cimentícias para reparação e consolidação de alvenarias de pedra, têm um alcance que vai desde 0,5 a 1,0. Para se ter um termo de comparação, as caldas que se destinam ao recobrimento de cabos de pré tensão, possuem rácios entre 0,35 e 0,42, enquanto os de injeção no solo ou rochas de fundação são mais fluidos, variando entre 1,0 e 2,0 (Rosquoët, Alexis, Khelidj e Phelipot, 2003).

Miltiadou-Fezans e Tassios (2012) destacam a importância prática de definir um limite para a relação água/ligante, que preveja o início de ocorrência de exsudação (*Bleeding*). Através de dados provenientes de misturas cimentícias, com substituição parcial de cal por pozolanas de menor finura e junção de superplastificante, fornecem-nos equações empíricas, que podem auxiliar no processo de formulação.

A equação seguinte permite estimar o valor crítico de w/b (em inglês w/b), a partir do qual poderá ocorrer exsudação:

$$\left(\frac{w}{s}\right)_{bl, crit.} = 1,1 \cdot \frac{S_A}{8,0} + 0,04 \text{ [cm/g]} \text{ (Miltiadou-Fezans e Tassios, 2013)} \quad (2.3)$$

Onde, S_A é a finura média de Blaine (cm^2/g).

Segundo um princípio idêntico, também é possível prever a ocorrência de exsudação em *grouts* que contenham uma determinada percentagem de SP:

$$\left(\frac{W}{S}\right)_{bl, crit.} = \frac{1}{8,0} - 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot SP\% \cdot S_A [cm/g] \quad (\text{Miltiadou-Fezans e Tassios, 2013}) \quad (2.4)$$

Onde, S_A é a finura média de Blaine (cm^2/g) e $SP\%$ a percentagem de superplastificante.

É de assinalar, que os resultados obtidos com estas equações são satisfatórios para misturas cujo limite crítico de exsudação, medido segundo o ensaio de estabilidade normalizado (NP EN 445, 2008), é de 5% e a finura média de Blaine (S_A) $\leq 9,000 cm^2/g$. Neste caso particular, a finura considera-se média, porque as formulações utilizadas por estes autores são de base de cimentícia com substituição parcial por cal, sílica de fumo ou terra de Santorini (com propriedades pozolânicas).

Em suma, os rácios de a/l apresentados no capítulo 3, referente à metodologia experimental, baseiam-se nas formulações disponíveis na bibliografia sobre o tema. Seguem diretrizes específicas para o tipo de ensaios a que serão submetidas, servindo este ponto apenas para demonstrar algumas das formas de afinação da formulação de um *grout*, diferentes das já sobejamente conhecidas (por exemplo: cone de Marsh, ensaio de espalhamento e o método estatístico de Taguchi).

• Adjuvantes - superplastificantes

A utilização deste tipo de adjuvante tem a finalidade de reduzir a dosagem de água, sem que, para isso, se percam a fluidez e a consistência que teriam com determinado rácio entre água e ligante (Sonebi, 2012). Atuam com base em mecanismos de repulsão, prevenindo uma floculação precoce das partículas sólidas, quando entram em contato com a água. Este efeito dispersivo depende do tipo de superplastificante, dos quais se destacam dois dos mais utilizados correntemente: os policarboxilatos (PCE) e os condensados de naftaleno formaldeído (SNF).

Os SNF pertencem a uma segunda geração de superplastificantes, cuja ação dispersiva resulta de uma repulsão electrostática, obtida pela ionização das partículas de ligante, dotando-as com um sinal de carga idêntico. Os PCE atuam predominantemente através de repulsão electrostática, complementada com repulsão estérica. Esta protege as partículas de ligante, entrepondo uma cadeia de polímeros (de densidade variável), que as mantém afastadas (Baltazar et al., 2013).

Nas figuras 2.3 e 2.4 pode observar-se o modo de atuação de cada uma dos superplastificantes descritos anteriormente:

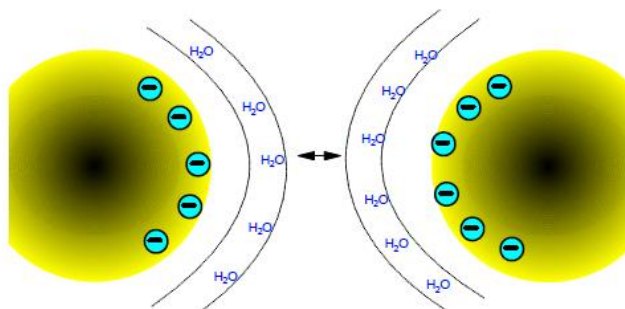


Figura 2.3 - Modo de atuação da repulsão eletrostática (adaptado de: (BASF, 2008))

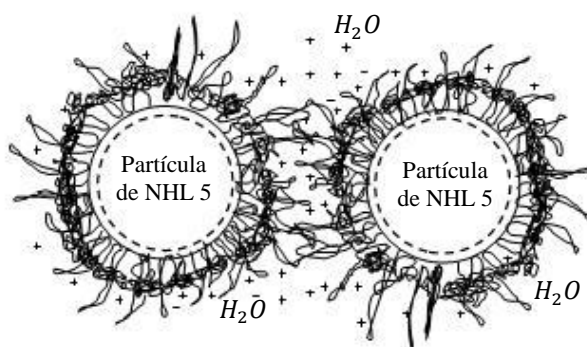


Figura 2.4 - Modo de atuação da repulsão eletroestérica. Caraterístico dos PCE (adaptado de: Napper, 1983)

2.3. Noções gerais de reologia

O termo reologia foi usado pela primeira vez por Bingham e Reiner em 1929, quando fundaram a sociedade americana com esse mesmo nome. Este, por sua vez, designa a ciência que se ocupa com estudo das propriedades físicas de líquidos e sólidos, descrevendo o seu comportamento, durante o escoamento ou sob deformação (Piotrowski e Cierniewski, 1982).

O conhecimento das propriedades reológicas é fundamental para a caracterização dos *grouts* no estado fresco. Assim como, a quantificação, em termos físicos, de algumas propriedades equivalentes às destacadas anteriormente de forma genérica, como a trabalhabilidade, fluidez e injetabilidade. Ao longo deste capítulo, são descritos os métodos de averiguação dos parâmetros reológicos, os princípios seguidos na sua medição e os modelos que descrevem o escoamento dos *grouts*.

De forma a serem compreendidos os conceitos explorados adiante, devem introduzir-se dois princípios base:

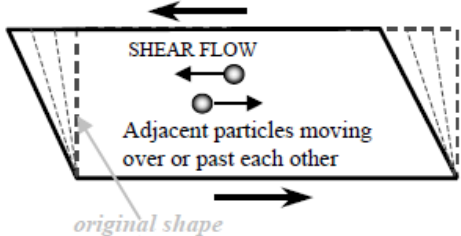
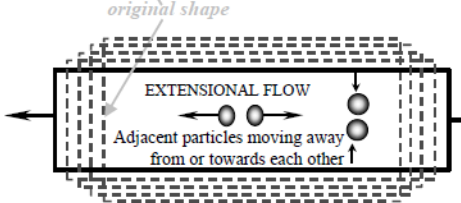
- Corpo elástico ideal (Hookeano) – experimenta deformação elástica se sujeito a aplicação de forças externas anisotrópicas (sem uma direção definida). A energia de deformação é acumulada,

resultando na total reposição da forma inicial, assim que as forças exteriores cessarem a sua ação. O seu modelo mecânico é representado por uma mola (Barnes, 2000).

- Corpo viscoso ideal (Newtoniano) – a deformação devido a forças anisotrópicas exteriores, irá resultar numa deformação irreversível, onde a energia, ao invés de ser armazenada, é transformada. Surge, aqui, o conceito de escoamento. O seu modelo mecânico é descrito por um amortecedor (*damper*) (Barnes, 2000).

Em escoamento, pontos adjacentes do corpo estão a mover-se relativamente uns aos outros (os elementos que o constituem estão em deformação). Geralmente contam-se dois tipos de escoamento:

Quadro 2.3 - Tipos de escoamento de acordo com o movimento descrito pelas partículas (adaptado de: Barnes, 2000)

Tipo de escoamento	Comportamento das partículas
Escoamento por corte (<i>shear</i>) – os elementos do líquido escoam sobre, ou através uns dos outros.	
Escoamento extensional – os elementos adjacentes do fluido, escoam ao encontro, ou se afastam uns dos outros.	

2.3.1. Propriedades reológicas

Existem várias formas, mais ou menos complexas, de demonstrar as propriedades reológicas dos fluídos. Um modelo conceptual, bastante perceptível, é o de placas paralelas. Neste modelo, a superfície de ambas as placas é conhecida, de área A (m^2) e a distância entre elas h (m). Entre as duas, encontra-se o fluido (1) que se pretende estudar, com uma espessura conhecida, também ela de valor h (m). A placa inferior (P1) fica imobilizada e a superior (P2) é movida por uma força F ($N = kg/s^2$) a uma determinada velocidade V (m/s). A partir deste instante, finas camadas do fluido começam a formar-se em altura, acompanhando o movimento da placa superior. Este escoamento laminar é de uma importância fundamental nas investigações reológicas, pois um escoamento turbulento iria aumentar a resistência ao escoamento, o que poderia resultar em falsas propriedades reológicas (Piotrowski e Cierniewski, 1982).

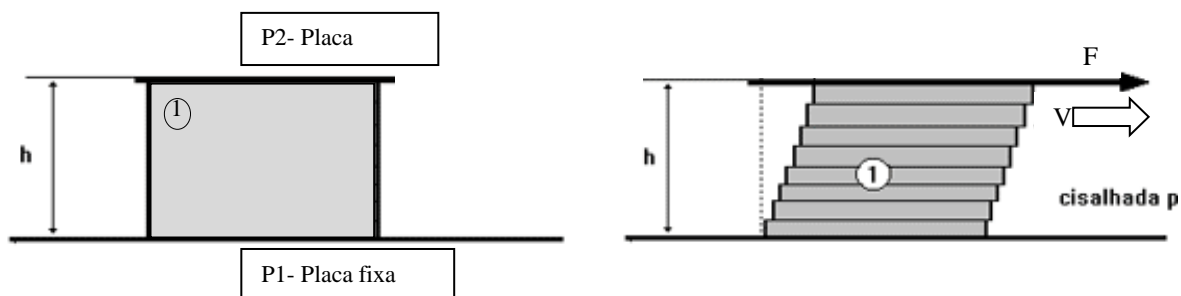


Figura 2.5 - Modelo conceitual de placas paralelas (adaptado de: (Piotrowski e Cierniewski, 1982))

Para se compreender, de forma clara, o que ocorre entre as placas, pode imaginar-se o derramamento de óleo sobre uma superfície inclinada. A primeira camada adere à superfície, enquanto as seguintes, deslizam sobre ela em camadas estratificadas. A facilidade com que o fazem depende da resistência ao movimento na interface das várias camadas, onde ocorrem tensões de corte. Em função do gradiente de velocidade, é possível quantificar essa tensão de corte (Henriques, 2011).

A velocidade de cada camada aumenta linearmente, respetivamente à camada vizinha inferior, de tal forma, que as camadas a uma distância duas vezes superior, a qualquer ponto da lâmina estacionária, se movem com o dobro da velocidade da camada imediatamente acima dessa e, assim, sucessivamente. O gradiente de velocidades na direção perpendicular ao plano de escoamento, é a chamada taxa de corte e a força por unidade de área, a criar ou a produzir escoamento, é a chamada tensão de corte (Barnes, 2000).

• Definições

Nesta seção serão definidas as propriedades físicas descritas anteriormente e, ainda, conceitos complementares, mas usuais em reologia, que servirão de base às temáticas abordadas ao longo deste capítulo.

(a) Tensão de corte

Uma dada Força F a atuar sobre uma superfície A, faz com que o fluido, entre as duas placas, seja afetado de um movimento controlado pelas forças internas do material (Piotrowski e Cierniewski, 1982):

$$\tau = \frac{\text{Força } F}{\text{Área } A} \text{ [Pa]} \quad (2.5)$$

(b) Taxa de corte

Ao ser aplicada uma força idêntica à do ponto anterior, com uma intensidade suficiente para que se gere um escoamento de corte laminar entre as duas placas, a lâmina de fluido superior mover-

se-á à velocidade máxima, $V_{máx}$. E, como foi dito anteriormente, devido ao repouso da placa inferior, também a primeira camada de fluido se mantém estática. O gradiente criado faz com que o diferencial de velocidade entre camadas adjacentes, de igual espessura, seja constante (Piotrowski e Cierniewski, 1982). Assim, a taxa de corte pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{\text{Velocidade } V}{\text{Distância } h} [s^{-1}] \quad (2.6)$$

(c) *Viscosidade dinâmica*

É uma propriedade reológica que permite medir a resistência dos corpos ao escoamento. Deve-se ao atrito interno, entre partículas (Barnes, 2000).

$$\eta = \frac{\text{Tensão de corte } \tau}{\text{Taxa de corte } \dot{\gamma}} [Pa.s] \quad (2.7)$$

Durante a sua ocorrência, todos os escoamentos experimentam alguma resistência devido à viscosidade. Através das expressões anteriores, pode concluir-se que, para uma dada força, a velocidade de escoamento é maior, onde a viscosidade for menor.

2.3.2. Escoamentos dependentes da solicitação

- **Fluídos Newtonianos**

Através da análise das curvas de escoamento ou viscosidade, podemos retirar algumas conclusões, acerca da lei de viscosidade pela qual o tipo de fluido em estudo se rege. Se houver proporcionalidade entre a taxa de corte e a tensão de corte, isto é, a curva de escoamento descrever uma linha reta, que passa na origem do eixo de coordenadas, então, esta relação guia-se pela lei de viscosidade de Newton. Nos fluídos Newtonianos (ou idealmente viscosos, ex.: água, algumas soluções betuminosas, óleos minerais), a viscosidade é independente da taxa de corte.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{constante} \quad (2.8)$$

Seguindo o raciocínio anterior, a viscosidade poderia ser apresentada graficamente em função da taxa de corte, resultando numa linha reta, paralela ao eixo das abcissas.

- **Reofluidificantes**

Alguns materiais, quando expostos a taxas de corte crescentes, exibem um decréscimo de viscosidade. Esta propriedade surge como uma grande vantagem, se tivermos em conta o tipo de misturas estudadas no âmbito da presente dissertação. Os *grouts*, durante o processo de injeção,

comparativamente aos fluidos Newtonianos, necessitariam de uma energia inferior de bombagem para a mesma velocidade de escoamento, se evidenciassem tais características. De facto, misturas como os *grouts*, sendo compostas por partículas em suspensão, enquadrar-se-iam neste tipo de materiais, uma situação que é discutível, como se verá mais adiante. O fenómeno poderá ser explicado pela forma como as partículas se reorganizam durante a aplicação de uma força exterior, mudando a sua orientação de acordo com a direção do escoamento, provocando um efeito de dissolução.

$$\tau / \dot{\gamma} = \eta_a \neq \text{constante} \quad (2.9)$$

O fator de proporcionalidade entre a tensão e a taxa de corte, que anteriormente era constante, tem agora a designação de viscosidade aparente, η_a . Representa a viscosidade a determinada taxa de corte $\dot{\gamma}$. A expressão matemática que descreve o comportamento dos materiais reofluidificantes é, segundo Ostwald De Waele:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (2.10)$$

Onde, $n < 1$ para o tipo de materiais que apresenta um comportamento fluidificante e $n > 1$, quando apresentam um comportamento espessante ,ou dilatante, com o aumento da taxa de corte.

Na figura 2.6 podem ser observados os diferentes comportamentos ideais, dos fluidos descritos anteriormente:

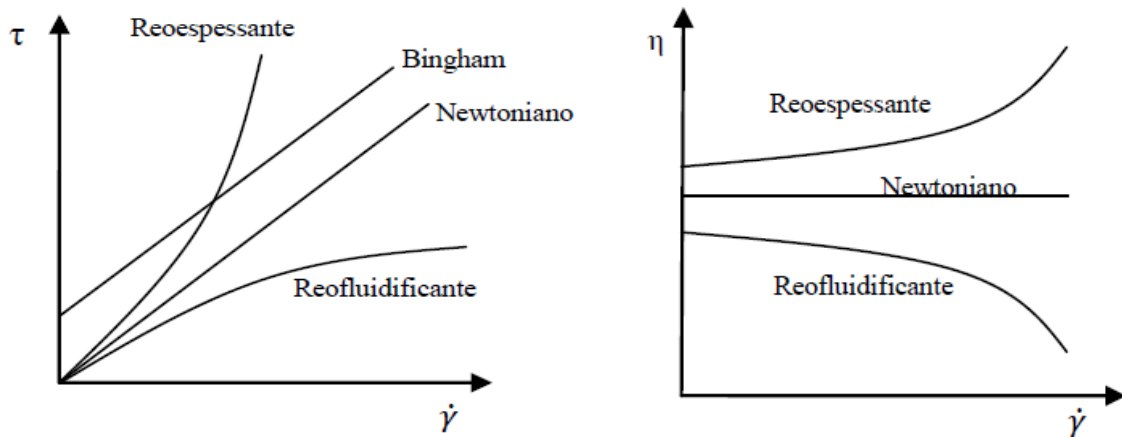


Figura 2.6 - Comportamento de fluidos ideais. Esq.: Curvas de fluxo de diferentes fluidos; Dir.: Curvas de viscosidade de diferentes fluidos - adaptado de: (Matos, 2013)

Além dos dois fluidos não-Newtonianos apresentados na figura 2.6, observa-se ainda a existência de um terceiro tipo, o fluido de Bingham. Este tipo de fluido exhibe uma relação linear, entre a tensão e a taxa de corte, semelhante à dos fluidos Newtonianos, depois de ultrapassado determinado valor de tensão de corte. Por outro lado, quando se verifica uma relação não linear, está-se perante um

fluido não Binghamiano (ver fig. 2.6 esq.). Os materiais cimentícios podem inserir-se neste grupo, mas em análises reológicas é muito usual assumir-se que se comportam como fluidos Binghamianos (Hanehara e Yamada, 2008).

- **Escoamento viscoplástico - plasticidade e tensão de cedência**

A viscoplasticidade caracteriza, portanto, os fluídos que apresentem uma tensão de cedência, τ_0 . A sua origem deve-se às forças intermoleculares entre partículas em suspensão, como por exemplo, as forças de Van Der Waals e repulsões eletrostáticas, no caso dos *grouts*. Estas forças coloidais entre os elementos de menor dimensão, também contribuem para a construção desta “rede” de interligação. Se as forças externas exercidas sobre o material forem superiores a estas, a pasta comporta-se como um fluido e escoa. Para valores inferiores aos de τ_0 , comporta-se como um sólido. Assim, a viscosidade do material só poderá ser medida, se a tensão de corte aplicada ao fluido ultrapassar a tensão de cedência.

De acordo com estudos prévios, visando a reologia de *grouts* no estado fresco e de um ponto de vista prático, a tensão de cedência está, muito provavelmente, associada à habilidade do *grout* em preencher os vazios e estar apto a fluir quando determinada taxa de corte é aplicada (Brás e Henriques, 2012).

A influência da tensão de cedência, durante o processo de injeção, pode ser evidenciada observando-se a curva de escoamento de materiais plásticos. À medida que a tensão de corte aumenta, a curva percorre o eixo das ordenadas, até atingir a tensão de cedência. Através desta análise é conhecida a forma como escoa o fluido sob deformação de corte, e pode obter-se um indicador da capacidade de penetração das caldas, sob determinada gama de tensões. Como é fácil depreender, a injetabilidade do *grout* é uma propriedade intimamente ligada com a quantidade de água utilizada na amassadura. Segundo Toumbakari (2002), um rácio elevado entre água/ligante, confere um comportamento praticamente newtoniano às misturas. Por outro lado, à medida que a concentração de ligante aumenta, o comportamento da mistura torna-se fluidificante (ou reofluidificante), passando a viscosidade a variar com a alteração da taxa de corte. Geralmente, tendo em conta os rácios a/l utilizados na formulação de *grouts* de injeção, o seu comportamento varia entre um comportamento reofluidificante e o de um fluido de Bingham. Recorre-se frequentemente aos modelos matemáticos desenvolvidos por Bingham e por Herschel-Buckley, para descrever o seu comportamento em deformação.

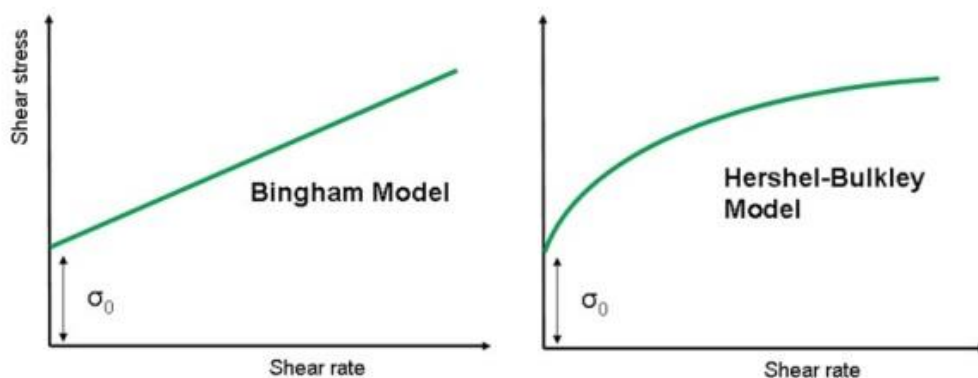


Figura 2.7 - Comportamento de um fluido viscoplástico (adaptado de: Malvern Instruments (2012))

2.3.3. Escoamento dependente do tempo

Uma das propriedades exibida por alguns fluídos não Newtonianos, é a habilidade em restituir a sua viscosidade inicial. Normalmente, as partículas das suspensões cimentícias, devido à sua proximidade e interação, exercem umas sobre as outras forças de atração que provocam floculação. Quando sujeitas a forças exteriores ou a deformações, ocorre desaglomeração e é reposta a sua estrutura inicial, acompanhada de uma diminuição da viscosidade (no caso dos fluidos reofluidificantes). Retirada a agitação, verifica-se nova floculação e o consequente aumento da viscosidade. Este fenómeno ocorre com um desfasamento temporal variável, em relação ao fim da aplicação da deformação imposta. Se esta recuperação for completamente reversível, o fluido é considerado tixotrópico, ainda que, no caso dos *grouts*, a recuperação estrutural não seja total.

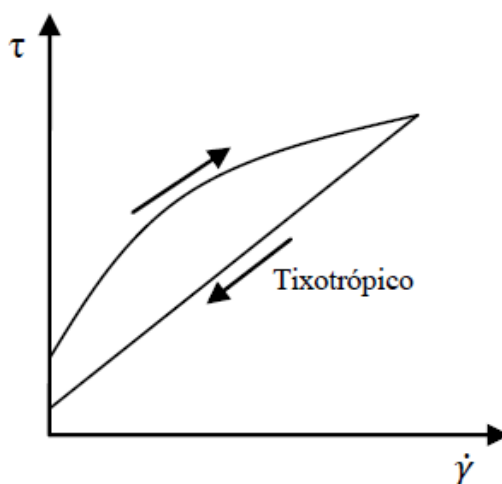


Figura 2.8 - Curva de fluxo de um fluido que possui propriedades tixotrópicas (adaptado de: (Matos, 2013))

Pela figura 2.8 pode concluir-se que, em oposição ao comportamento de um material plástico, a alteração e a reposição dos valores de tensão de corte é feita percorrendo a mesma curva. Existe uma

incoerência no trajeto, que define uma área entre as duas linhas, chamada área de histerese. Esta, estabelece o quão dependente do tempo é o comportamento do fluído, isto é, quanto maior for a área de histerese, mais tempo necessita para repor o seu estado inicial (mais tixotrópico é) (Piotrowski e Cierniewski, 1982). O comportamento inverso, aumento gradual da viscosidade quando sujeito a uma tensão, seguido da recuperação após a retirada da tensão, é designado por tixotropia negativa ou anti tixotropia (Matos, 2013).

2.3.4. Modelos matemáticos de interpretação do escoamento

Os modelos matemáticos apresentados neste ponto, alguns deles já referenciados anteriormente, visam a representação do comportamento das suspensões durante o escoamento. As equações procuram descrever o escoamento dos *grouts*, ajustando-se da melhor forma às curvas de fluxo. Para tal, é necessário que transmitam de que modo a viscosidade está dependente da velocidade de deformação ou da tensão.

Na comunidade científica não existe consenso sobre qual dos modelos existentes é o mais adequado para caraterizar este tipo de caldas cimentícias. Seguidamente apresentam-se em pormenor, os modelos de Bingham, Bingham modificado e de Herschel-Bukley que, pela sua simplicidade, são utilizados com maior frequência nos trabalhos de investigação. Além destes, que se perfilam como escolhas preferenciais na caraterização reológica feita mais adiante (durante a campanha experimental), serão referidas outras opções.

- **Modelo matemático de Bingham**

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.11)$$

Onde, τ_0 é a tensão de cedência (Pa), η_p a viscosidade plástica (Pa.s) e $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}). Este surge como uma derivação do modelo de Sisko, se considerarmos $n = 1$. O modelo original é descrito pela seguinte equação:

$$\eta = \eta_\infty + k_2 \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.12)$$

Onde, k_2 é a chamada “consistência”, de unidades $Pa \cdot s^n$, sendo n o índice da “lei de potência”, que define se a mistura é mais ou menos reofluidificante, consoante o seu valor se aproxima mais de 1 ou de 0, respetivamente. Pode ainda recorrer-se a um modelo de Bingham modificado (Baltazar et al., 2013), que nos permite um ajuste a curvas de escoamento que, durante o escoamento ou deformação induzida e após ser excedida a tensão de cedência, não apresentem um desenvolvimento exatamente linear. A equação que o define é a seguinte:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} + c \cdot \dot{\gamma} \quad (2.13)$$

- **Modelo matemático de Herschel & Bulkley**

Ao contrário do modelo de Bingham, este é capaz de descrever tanto o comportamento dos líquidos reofluidificantes, tal como o dos reoespessantes (Matos, 2013):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.14)$$

Onde n é o índice da “lei de potência”, idêntico ao do modelo de Sisko, τ é a tensão de corte (Pa), τ_0 a tensão de cedência (Pa), K é o índice de consistência e a taxa de corte (s^{-1}). Apresenta, portanto, três parâmetros ajustáveis, ao contrário do modelo de Bingham.

Rahman e Nehdi (2004) compilaram os resultados da estimação dos parâmetros reológicos de pastas de cimento, de acordo com a utilização dos diferentes modelos. Concluíram que, de modo geral, o modelo de Bingham modificado subestima os valores da tensão de cedência, ao contrário do modelo de Herschel-Buckley, que os sobrestima. Os modelos de Casson e Bingham ocupam uma posição intermédia, no intervalo de valores estimados. No entanto, é de registar que apenas os modelos de Bingham e Bingham modificado, mostraram uma sensibilidade significativa à redução do rácio a/l , conduzindo a um aumento da tensão de cedência. Para todos os modelos, quer tenham sido utilizadas geometrias lisas ou rugosas nos ensaios com reómetro rotacional, a viscosidade plástica vê o seu valor crescer, quando o rácio a/l decresce.

Apesar de as pastas de cimento exibirem um comportamento semelhante ao dos *grouts*, estas conclusões servem apenas de guia e de termo de comparação, para os resultados da campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação.

2.3.5. Reometria rotacional

Para a determinação dos parâmetros reológicos, dispõe-se de uma grande variedade de procedimentos e equipamentos. A escolha de quais utilizar, poderá recair sobre: o grau de precisão requerido por cada tipo de trabalho, a disponibilidade de recursos e a finalidade da aplicação dos resultados que daí se obtêm. Os procedimentos abrangem desde ensaios expeditos, realizados com equipamentos simples, que fornecem – ainda que indiretamente – indicadores de fluidez e estimativas da tensão de cedência, até aparelhos tecnologicamente evoluídos, como os reómetros rotacionais e viscosímetros. Estes são capazes de transmitir informações mais complexas, como a viscosidade em função da taxa de corte, da tensão normal e da tensão de corte. Determinam a viscosidade em função da velocidade angular, do tempo e da temperatura e permitem caracterizar materiais viscosos e viscoplásticos, em função da tensão de corte aplicada.

Durante a campanha experimental reológica, levada a cabo no desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se um reómetro rotacional Bohlin Gemini HR^{NANO} (Malvern Instruments), cujo princípio de leitura assenta numa disposição com geometrias de pratos paralelos. Na figura (ver fig. 2.9) seguinte mostra-se, em pormenor, uma amostra de *grout* durante um ensaio neste mesmo reómetro, acompanhada de um esquema que representa o sistema de medição. A geometria considerada é de face plana e lisa:

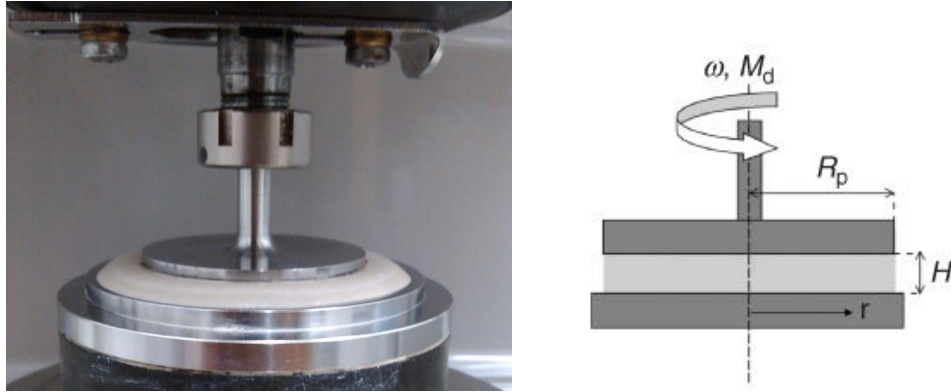


Figura 2.9 - Representação do modelo de medição reológica com pratos paralelos. Esq.: Pormenor de amostra de *grout* durante um ensaio; Dir.: Esquema do sistema de medição utilizado pelo reómetro (Jameel e Hershenson, 2014)

No esquema anterior, R_p representa o raio do prato superior e H , o *gap* que estabelece a que distância entre os dois pratos. No caso dos *grouts*, o *gap* não deve ser inferior a dez vezes o tamanho da maior partícula da suspensão, sob pena de ocorrerem bloqueios à livre rotação da placa superior, conduzindo à determinação de falsas propriedades reológicas.

Surgem, então, duas programações possíveis de leitura no reómetro:

- **Testes de escoamento com taxa de corte controlada (CSR – controlled shear rate)**

Nesta programação define-se a taxa de corte a ser aplicada à amostra, calculada pelo reómetro com base na velocidade angular do prato (ω) e no *gap* (H). É, então, medido o momento resistente (M_d) durante o escoamento/deformação. É importante referir, que em geometrias planas, a taxa de corte não é constante em toda superfície. Tem um valor nulo no centro, apresentando o valor máximo na borda do prato, onde $r(\text{raio}) = R_p$ (m). A força necessária ao movimento rotacional pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = M_{\text{deformação}} \cdot R_{\text{prato}} \quad (2.15)$$

Onde M_d é o torque (mNm). Posteriormente, é calculado automaticamente o parâmetro reológico τ , em função da variação da taxa de corte ao longo do *gap*.

- **Testes de escoamento com Tensão de corte controlada (CSS – controlled shear stress)**

Com este sistema é definido, à priori, o torque a ser aplicado (M_d). Este, em função da área da geometria ($A = 2 \cdot \pi \cdot R_p$), permite ao reómetro sujeitar a amostra a uma tensão de corte (τ) controlada.

Assim, através da velocidade linear (v) atingida pelo prato, é possível retirar o parâmetro reológico $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma}(R_p) = \frac{v}{H} = \frac{\omega \cdot R}{H} \quad (2.16)$$

Onde, $\omega = 2\pi \cdot \frac{n}{60}$ (rad/s) e n as rotações por minuto (min^{-1}).

Ambos os sistemas permitem calcular a viscosidade aparente, com base na expressão (2.7), anteriormente apresentada.

No capítulo seguinte, será feita uma descrição mais detalhada das configurações introduzidas no *software* que acompanha o reómetro, que em última instância, definem a escolha do sistema de leitura adotado.

2.3.6. Fenómenos que propiciam erros de medição

Para que os ensaios decorram sem percalços, devem ter-se cuidados no manuseamento do reómetro e na programação das leituras, nomeadamente na definição dos limites de rotação e de tensão, para que os resultados sejam os mais corretos. Nesta seção, mostram-se alguns fenómenos que poderão adulterar os resultados das leituras, de forma a poderem ser ultrapassados aquando da campanha experimental.

- **Fenómeno de Wall slip ou efeito de parede**

Devido à planeza das superfícies de medição (“parede”) dos viscosímetros e reómetros, podem surgir alguns problemas quando colocados fluídos estruturantes/estruturados, como é o caso das suspensões, em contato com essas superfícies.

No caso de suspensões simples, compostas por partículas esféricas, a concentração espacial das partículas, no interior da massa do conjunto e longe da superfície de leitura, é aleatória. Mas, junto aos pratos ou às hastes de medição (no caso dos viscosímetros), a concentração de partículas é praticamente nula. Este comportamento, faz com que a concentração de partículas, à medida que nos

afastamos da “parede”, aumente drasticamente, até se atingir uma concentração homogênea, que caracteriza a amostra. Uma conclusão de fácil visualização, tratando-se de suspensões, é a formação na interface “parede”-amostra, de uma lâmina lubrificante, onde se deposita a água livre da mistura. Quando o prato ou haste iniciam o movimento giratório, rodam sobre essa lâmina, o que impede numa fase inicial do ensaio, que as tensões de corte sejam transmitidas eficazmente às camadas de *grout* propriamente dito. O fenómeno descrito é chamado de depleção, mas mais conhecido como escorregamento. O efeito de escorregamento está muito dependente do tamanho das partículas em suspensão, o que para suspensões floculadas, significa tamanho dos flocos, que por sua vez está dependente da taxa de corte. Aqui é importante lembrar a floculação das partículas, que será maior com uma taxa de corte menor. Assim, no caso dos *grouts*, o escorregamento será um fenómeno observado, em princípio, para taxas de corte baixas (Barnes, 2000).

Os autores Rahman e Nehdi alertaram, ainda, para a possibilidade de o *gap* influenciar a estimativa da tensão de cedência, indicando que o escorregamento poderá ser maior à medida que o *gap* aumenta (Hanehara e Yamada, 2008).

Algumas formas de eliminar ou, pelo menos, minimizar os efeitos de escorregamento, são:

- No caso de reómetros rotacionais de pratos paralelos: usar geometrias cerradas ou rugosas.
- Nos viscosímetros, as hastes devem ser, idealmente, de pás giratórias ao invés das tradicionais hastes cilíndricas, mais esbeltas e propícias a criar efeito de “parede”.

Como se poderá verificar no capítulo que descreve a campanha experimental, teve-se a oportunidade de trabalhar com um viscosímetro, nomeadamente, o BROOKFIELD DV-II+Pro. Os ensaios foram realizados com uma vareta cilíndrica, devido à impossibilidade de recorrer a uma dotada de pás. Não se faz referência a este aparelho no ponto 2.3.5 pois, o propósito com que foi utilizado não foi o mesmo que levou à utilização do reómetro rotacional, como será explicado mais adiante. De facto, durante os ensaios com este aparelho, foi possível observar o chamamento de água para a superfície desta geometria. A figura seguinte pretende ilustrar a ocorrência do fenómeno, para as diferentes misturas analisadas.



Figura 2.10 - Efeito de parede junto à geometria do viscosímetro – esq.: $a/l = 0,45$ e $SP=1\%$; centro: $a/l = 0,5$ e $SP=1\%$; dir.: $a/l = 0,55$ e $SP=1\%$

- **Evaporação**

A evaporação é, geralmente, crítica em geometrias de cone e placa e em pratos paralelos, onde a secagem nas extremidades das amostras, pode levar a erros de medição. Existem duas formas de proceder, com vista a suprimir este efeito:

- Criar uma atmosfera saturada no ambiente em que a amostra é ensaiada;
- Utilizar uma ratoeira (*trap*), rodeando a amostra com um solvente.

- **Sedimentação/separação**

Durante um ensaio de duração prolongada, podem surgir problemas devido à sedimentação, potenciada pelo tempo de ensaio maior do que o esperado. Mesmo nas soluções que tenham sido melhoradas, por exemplo diminuindo o rácio a/l para engrossar a mistura, ao iniciar-se o ensaio de corte, a viscosidade é reduzida e, por conseguinte, a capacidade da amostra em manter as partículas em suspensão pode ser afetada. A única forma de acautelar esta situação seria promover uma circulação da suspensão durante o ensaio, bombando desde a base do viscosímetro até à superfície (no caso de um reómetro rotacional, dotado de geometria de cilindro concêntrico). Num reómetro de pratos paralelos não é possível seguir esta recomendação, visto que a forma de operar não o permite. De modo a contornar possíveis erros de medição podem seguir-se as seguintes indicações:

- Taxas de corte adequadas. Nestes casos, em adição ao escorregamento, a escolha de taxas de corte erradas pode originar erros na estimação da tensão de cedência (Saak et al., 2001).
- Agitação da mistura, de forma metódica, entre ensaios. Promovendo a recirculação das partículas desde a base do recipiente até à superfície, de forma a reaver alguma da homogeneidade inicial.

- **Partículas suspensas e gap adequado**

A análise de suspensões pode conduzir a vários problemas, devido à possibilidade de partículas de maior dimensão emperrarem em certas geometrias, nomeadamente as cónicas. Mas, se o *gap* utilizado na medição for entre dez a vinte vezes maior que as partículas em questão, então a sua distribuição espacial não irá sofrer interferências por parte da “parede” e a viscosidade da mistura é medida corretamente.

Em jeito de conclusão do presente ponto, seria interessante mostrar alguns dos *gaps* utilizados por vários investigadores durante os estudos sobre as propriedades reológicas de *grouts*. Mas, devido à inexistência de um ensaio normalizado que defina, concretamente, qual o espaçamento a utilizar entre os pratos do reómetro para cada tipo de formulação, esta é uma informação que normalmente não é especificada ou, quando o é, não é possível estabelecer um padrão de escolha coerente de um autor para outro.

Assim, como se poderá ver adiante, o valor de escolha do gap não deve ser demasiado baixo, para não ocorra um espalhamento significativo da amostra, nem demasiado alto para não estar sujeito aos efeitos do escorregamento. Desta forma, a caracterização do comportamento reológico, das várias misturas, poderá ser o mais próximo possível da realidade.

3. Métodos e procedimentos experimentais

3.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se explicar, de forma clara, a metodologia experimental seguida ao longo de toda a campanha. Será feita uma descrição de todos os procedimentos experimentais, uma caracterização detalhada de todos os materiais e equipamentos utilizados, assim como o cuidado e o rigor tidos na sua utilização.

Os procedimentos experimentais estão divididos em dois grupos: ensaios de fluidez-estabilidade e reométricos, que visam a caracterização das amostras no estado fresco. O primeiro inclui o cone de Marsh, ensaio de espalhamento, ensaio de estabilidade e ensaio de retenção de água. O segundo grupo conta com ensaios programados num *software* dedicado, pertencente ao reómetro do Departamento de Ciências dos Materiais da FCT, com vista à caracterização dos principais parâmetros reológicos (τ_0 , τ e η) e à quantificação da velocidade de escorregamento.

3.2. Materiais

3.2.1. Cal hidráulica natural (NHL 5)

Para a elaboração dos *grouts* analisados no âmbito da presente dissertação, utilizou-se como ligante a cal hidráulica natural (NHL 5) produzida pela Secil Martingança, e que cumpre os requisitos da Norma Europeia EN459-1 2011.

A água de amassadura, utilizada para o efeito, foi retirada da rede pública do concelho de Almada. Dos adjuvantes disponíveis no mercado e elegíveis para a constituição de *grouts* de injeção, optou-se apenas por um, o superplastificante. No quadro seguinte (ver quadro 3.1), são apresentadas as características exigidas pela norma – excetuando o valor da superfície específica de Blaine - de acordo com as informações dadas pelo fornecedor.

Quadro 3.1 - Características da cal hidráulica natural NHL 5, de acordo com o fornecedor (Sequeira, Frade, e Gonçalves, 2007)

Requisitos			Valores
Químicos	Cal livre		$\geq 3\%$
	Sulfatos		$\leq 3\%$
Resistências Mecânicas	Compressão 7 dias		$\geq 2 \text{ MPa}$
	Compressão 28 dias		$\geq 5 \text{ MPa e } \leq 15 \text{ MPa}$
Físicos	Finura (%)	900	$\leq 15 \mu\text{m}$
		200	$\leq 5 \mu\text{m}$
	Água livre		$\leq 2\%$
	Expansibilidade		$\leq 2\text{mm}$
	Penetração		$\leq 30\text{mm}$
	Teor em ar		$\leq 4\%$
	Tempo de Presa	Início	$> 1\text{h}$
		Fim	$< 15\text{h}$
	Superfície específica de Blaine		$9400\text{cm}^2/\text{g}$

3.2.2. Superplastificante

O superplastificante utilizado como adjuvante da mistura pertence à família dos naftalenos, comercialmente conhecido como ChrysoFluid AG. Num capítulo anterior, ponto 2.2.2, foi abordado o tema dos superplastificantes e a sua influência no comportamento das misturas. No quadro 3.2 são apresentadas as suas características.

Quadro 3.2 - Características do Superplastificante

Caraterísticas	Valores
Aspeto (cor)	Castanho-escuro
Densidade (20°C)	$1,20\text{g}/\text{cm}^3$
Ponto de Congelação	-5°C
Conteúdo de iões	Isento ($\leq 0,1\%$)
pH	7

Por norma, os *grouts* são formulados para possuírem um conjunto de requisitos, relacionados com a fluidez, estabilidade e performance durante a injeção e ao longo do seu tempo de vida. No entanto, dado o contexto deste trabalho, as proporções apresentadas no quadro 3.3, foram pensadas para que as misturas exibissem diferentes níveis de estabilidade e retenção de água, de modo a sobressaírem os dados e os comportamentos que daí possam resultar (Assaad, 2015).

Assim, o rácio $a/l = 0,45$ pretende representar misturas muito estáveis e pouco fluidas, enquanto os rácios seguintes (0,5 e 0,55) representam misturas mais fluidas, garantindo bastante hidratação do ligante e uma injetabilidade adequada.

A dosagem de superplastificante foi definida de acordo com a mínima dosagem (0,5% do peso ligante), que produz um melhoramento de fluidez notório, de acordo com os resultados dos testes levados a cabo por estudos anteriores. Por outro lado, a concentração mais alta (1,5% do peso de ligante) corresponde à concentração de saturação, acima da qual, a quantidade de superplastificante que não foi absorvida, conduz à floculação das partículas de ligante, podendo provocar problemas de estabilidade (Baltazar et al., 2013).

3.4. Procedimento de amassadura

As amassaduras foram todas realizadas no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC-FCT), num período que se estendeu de Fevereiro de 2015 a Maio do mesmo ano. Todos os ensaios descritos neste capítulo foram realizados nas mesmas instalações, à exceção os ensaios reológicos, que se realizaram no Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT) da FCT.

Primeiramente pesou-se a quantidade de cal hidráulica necessária à realização da mistura pretendida, com o auxílio da “balança 1” (ver fig. 3.2a). Da mesma forma, recorrendo a provetas (ver fig.3.2d), pesa-se a quantidade de água à qual se irá juntar o ligante. Nesta fase, pesam-se duas quantidades de água distintas, uma referente a 70% do peso total a utilizar, contabilizando à parte a restante. A quantidade de superplastificante é pesada na “balança 2” (ver fig. 3.2b), pois é a que oferece maior precisão. Depois de humedecer previamente a pá e o balde da misturadora (ver Fig. 3.2c), colocam-se neste a quantidade de água respetiva a 70% de água, juntamente com a totalidade da cal hidráulica. Esta calda inicial é misturada durante 2 minutos, período durante o qual, se dissolve à parte o superplastificante nos 30% de água que sobram. Ao fim deste tempo, desliga-se a misturadora e, com o auxílio da espátula flexível, dissolvem-se as partes do *grout* que formem grumos ou que estejam depositadas no fundo, de forma, a que todas as partículas estejam igualmente distribuídas e a mistura mais homogénea. Esta etapa tem uma duração variável, entre 1 a 2 minutos, conforme as misturas são mais ou menos fluidas. Liga-se novamente a misturadora e adiciona-se a mistura de água+superplastificante durante os 30 segundos seguintes. O processo decorre durante mais 2 minutos.

Por fim, o *grout* é transferido do balde para um recipiente de plástico (ver fig. 3.2e), sendo previamente peneirado recorrendo ao nº 16 da serie ASTM (ver fig.3.2e) e sem aplicação prática, garantindo assim, que a mistura que será ensaiada não possui quaisquer grumos, que possam interferir nos resultados das medições descritas mais adiante.

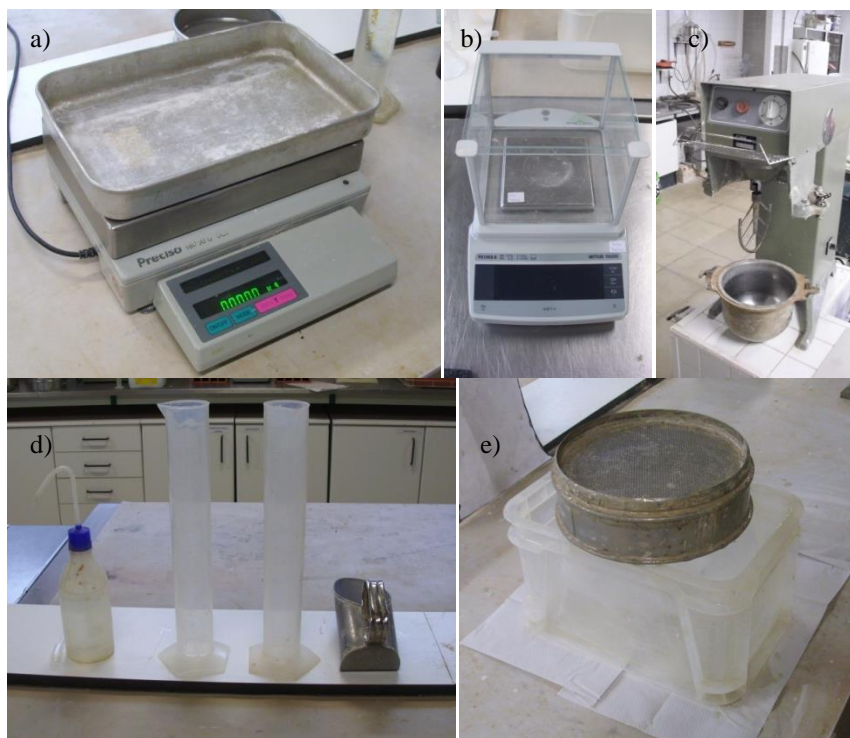


Figura 3.2 - Equipamento e material para preparação e ensaio de *grouts* – a) Balança nº1; b) Balança nº2; c) Misturadora; d) Provetas de plástico graduadas, esguicho e colher; e) Caixa plástica e peneiro nº16 (ASTM)

O procedimento de amassadura descrito foi adotado para todas as misturas, quer fossem destinadas ao ensaio de estabilidade, quer a medições reológicas. O objetivo é: garantir uma preparação idêntica pelo mesmo operador em todas as misturas, de forma a eliminar qualquer tipo de erro que pudesse resultar deste processo, pois, como é do conhecimento empírico, diferentes velocidades de agitação têm influência na percentagem de ocorrência de exsudação na mistura.

3.5. Ensaio do cone de Marsh

Um método usual para a avaliação da fluidez de um *grout*, é o ensaio do cone de Marsh. As referências normativas para a realização deste ensaio variam de país para país, mas o princípio a seguir é idêntico: registar o tempo necessário para que determinada quantidade de *grout* escoe através de um recipiente cónico (Roussel e Le Roy, 2005). Obtém-se desta forma um bom indicador da viscosidade do fluido, pois quanto maior o tempo de escoamento no cone, maior será a sua viscosidade. Este ensaio é muitas vezes utilizado com o intuito de afinar a formulação do *grout*, permitindo encontrar a

dosagem adequada de superplastificante (Baltazar e Henriques, 2012). Neste caso, optou-se por seguir as referências da norma ASTM C939-02.

- **Procedimento experimental**

Para a realização do ensaio foi utilizado um cone de dimensões diferentes das recomendadas pela norma, como o que está representado na figura 3.3:

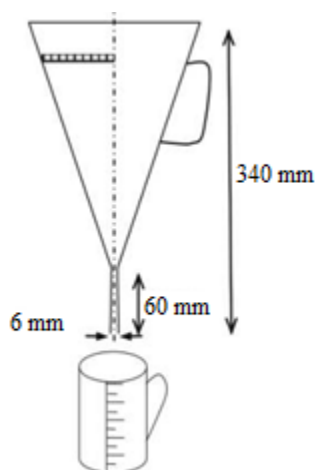


Figura 3.3 - Representação esquemática do ensaio do cone de Marsh

Antes de iniciar o processo, teve-se o cuidado de humedecer o cone e verificar o seu posicionamento no suporte. Tapando a abertura inferior, verteu-se uma quantidade de *grout* de 800ml para o interior do cone. Destapa-se o orifício, ao mesmo tempo que se inicia a contagem de tempo num cronómetro digital, cessando quando a totalidade do fluido estiver no recipiente graduado, que se encontra à saída do conjunto.

3.6. Ensaio de espalhamento

É um ensaio desenvolvido, originalmente, para a avaliação da trabalhabilidade e consistência do material, devido à sua simplicidade e relativa precisão (Gao e Fourie, 2015). Pode considerar-se que uma argamassa possui uma boa trabalhabilidade, quando: se apresenta branda ao manuseamento, exibe alguma plasticidade, se espalha facilmente com uma colher de pedreiro e tem uma boa aderência às superfícies verticais (Hanley e Pavía, 2008).

O ensaio consiste no enchimento, com o *grout* a ser analisado, de um recipiente cilíndrico, que depois é levantado. Em causa está o registo do diâmetro de espalhamento final, que poderá ser usado para estimar a tensão de cedência do material (Gao e Fourie, 2015).

- **Procedimento experimental**

O procedimento experimental realizou-se segundo as indicações da norma NP EN 445 (2008), com recurso a um recipiente cilíndrico com 60mm de altura e um diâmetro de 39mm, centrado sobre uma placa de vidro e uma esquadria. O conjunto é disposto como indicado na representação esquemática da figura 3.4:

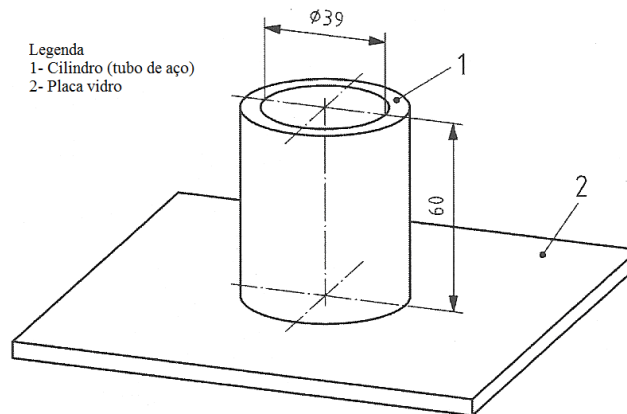


Figura 3.4 - Representação esquemática do ensaio de espalhamento (adaptado de: (NP EN 445, 2008))

Depois de cheio, sem transbordar e de modo a que não fiquem bolhas de ar aprisionadas, o molde é levantado cuidadosamente e a uma velocidade o mais constante possível. Para a medição dos diâmetros de espalhamento, registam-se 4 valores, indicados segundo duas direções ortogonais da esquadria. Ao contrário do requerido no documento normativo, onde são utilizados apenas dois valores, neste caso o diâmetro de espalhamento é calculado da seguinte forma:

$$e = \frac{d1 + d2 + d3 + d4}{4} \quad (3.1)$$

Onde, e é o espalhamento médio (cm) e $d1$, $d2$, $d3$ e $d4$ são os diâmetros registados nas direções ortogonais da esquadria (cm).

3.7. Caraterização da estabilidade dos *grouts*

O procedimento apresentado nesta seção, surge como resposta à necessidade de avaliar rigorosamente a estabilidade dos *grouts* em tempo real. A instabilidade é evidenciada pela incapacidade do *grout* em manter a sua homogeneidade, devido ao assentamento das partículas em suspensão, que conduz à ocorrência de exsudação e, em casos mais graves, a segregação. Quanto mais instável, maior e mais rápida é a tendência de separação entre a fase sólida e a fase líquida. Este

fenómeno é mais perceptível à superfície da mistura. O assentamento de partículas implica, portanto, uma quebra contínua no peso específico nessa zona do *grout*.

Segundo a lei de Arquimedes, um objeto flutuante experimenta uma força ascendente, exercida pelo líquido e denominada impulsão. Esta, por sua vez, vai sendo cada vez menor quanto maior for a perda de peso específico do *grout*. Com base nestas observações, Van Rickstal (2000) desenvolveu um método de monitorização com registo permanente dos valores da impulsão, que possibilitam a caracterização das misturas quanto à sua estabilidade, abandonado assim, a dependência da observação visual – e muito menos precisa – da evolução fenómeno, que era habitual em métodos clássicos.

• Procedimento experimental

Depois do processo de amassadura, é transferida uma quantidade de 400ml de *grout* (por razões de limite de peso, impostas pela balança onde é realizado o ensaio) para um goblet com capacidade para 500ml, colocado posteriormente na balança nº 2. Depois de tarar o conjunto, é inserida uma esfera metálica com um volume de $4,85\text{cm}^3$ e massa de 34,29g, suspensa de forma perfeitamente estável, conferida pelo esquema de montagem representado na figura 3.5:

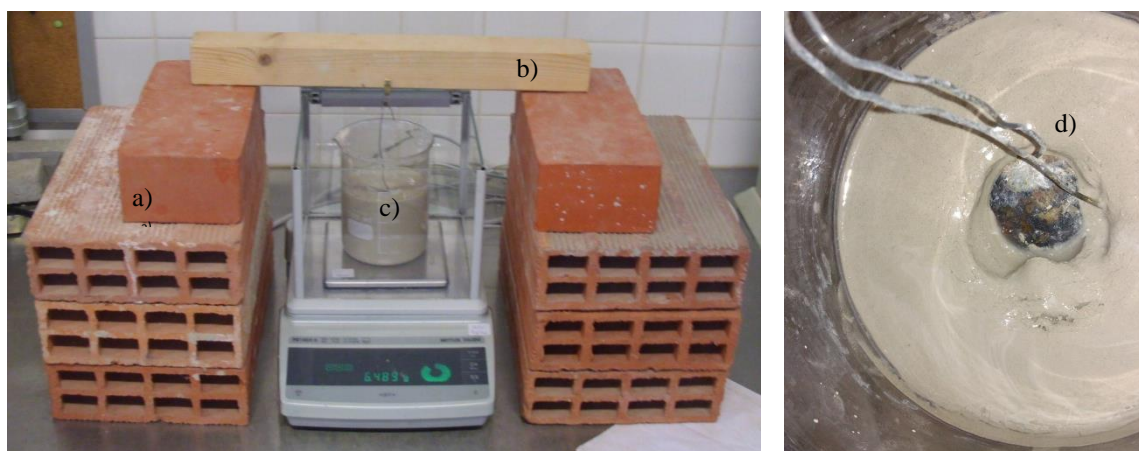


Figura 3.5 - Ensaio de estabilidade. Esq.: Equipamento e esquema de montagem do ensaio – a) tijolos; b) trave de madeira; c) goblet e *grout*; d) balança nº2; Dir.: Esfera imersa em *grout* durante um ensaio

Com a balança zerada, os números que surgem no visor dizem respeito à força de impulsão sentida pela esfera. Os valores apresentados são registados de 5 em 5 minutos, ao longo do tempo de ensaio (90 minutos no total), correspondendo o valor lido inicialmente a 100% do peso específico do *grout*. Com o decorrer do ensaio, as partículas vão-se concentrando em maior número no fundo do recipiente, o que no final, leva a que a impulsão sentida seja menor que a inicial e se registre uma maior

perda, em percentagem, do peso específico da amostra. Esta perda é tanto maior, quanto mais instável for a mistura.

Posteriormente, a análise de dados segue o seguinte princípio:

$$\frac{\text{massa lida na balança (g)}}{\text{volume da esfera (cm}^3\text{)}} = \rho \text{ (peso específico da amostra) } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \quad (3.2)$$

Assim, através do quociente entre os sucessivos valores de ρ e o valor fixo de ρ_i (Peso específico inicial) em g/cm^3 , é possível traçar a evolução da estabilidade da mistura ao longo dos 90 minutos de monitorização, com o auxílio da expressão:

$$\frac{\rho(x)}{\rho_i} \times 100 = \text{Peso específico no minuto } x \text{ (\%)} \quad (3.3)$$

Os resultados deste procedimento experimental são apresentados no capítulo da discussão de resultados, no ponto 4.1.2.

• Equipamentos

No ensaio de estabilidade foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Tijolos, que formam a estrutura onde assenta a trave de madeira que sustenta a esfera metálica (ver fig. 3.5a);
- Trave de madeira com um (ver fig. 3.5b);
- Esfera metálica soldada a um fio de arame (ver fig. 3.5d);
- “Balança 2” (ver fig. 3.2a);
- *Goblet* (ver fig. 3.5c).

3.8. Ensaio de retenção de água Vs. Viscosidade aparente

Em operações de injeção, é frequente sujeitar a alvenaria à instalação de vácuo, obrigando a que os espaços, que antes estavam ocupados com ar, passem a ser preenchidos por *grout*. É de salientar que, no interior das alvenarias, os mecanismos de extração de água caraterísticos dos meios altamente porosos, que controlam as quantidades de transferência de água e propriedades de absorção capilar, se tornam altamente proeminentes quando é aplicada uma pressão de vácuo (Assaad, 2015).

Joseph J. Assad, citando outros autores (Green, Carter, Hoff e Wilson , 1999), afirma mesmo, que a retenção de água está diretamente relacionada com a pressão aplicada. Neste sentido, descrevem-se seguidamente dois ensaios que visam a caracterização da capacidade da retenção de água e a avaliação, em tempo real, da viscosidade aparente do *grout* com a perda de água.

- **Procedimento experimental**

Em primeiro lugar, foi realizado o ensaio proposto pela norma ASTM C941-02 (American Society for Testing and Materials, 2002), para a medição da retenção de água. O princípio experimental consiste em induzir exsudação nas amostras. O *grout* é colocado sobre um papel de filtro absorvente num funil de Buckner, com capacidade de 500ml, que por sua vez, está ligado a uma bomba de vácuo. A água é recolhida numa proveta graduada, registando-se simultaneamente o tempo (em s) necessário à extração de uma quantidade de 30ml, 45ml e 60ml. No topo do cilindro é colocada uma rolha humedecida, prevenindo a evaporação durante o ensaio. A depressão à qual são sujeitas as amostras, é controlada por um manómetro digital, regulado para um valor que rondou, em média, 10% da pressão atmosférica.

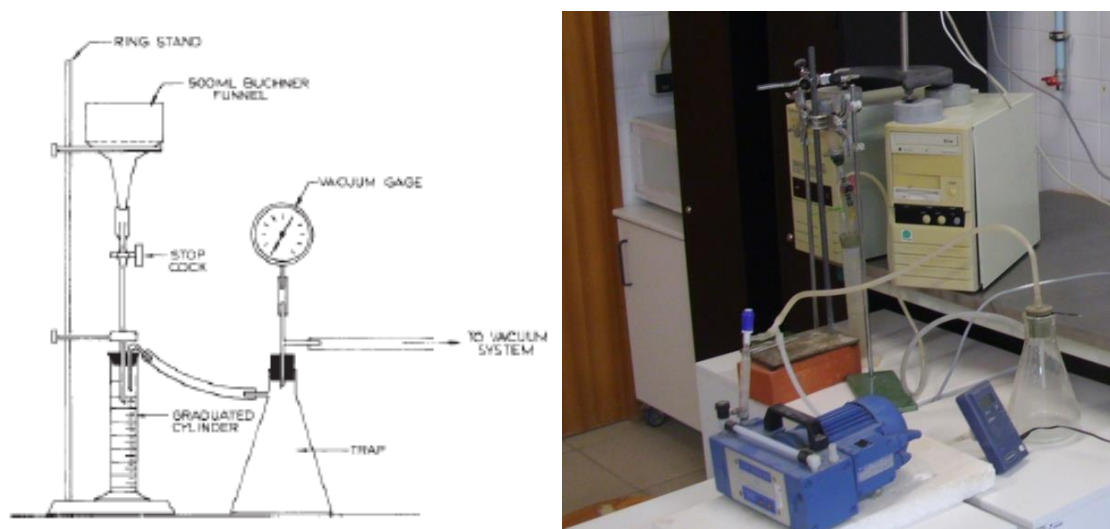


Figura 3.6 - Esquema de montagem do ensaio de retenção de água. Esq.: figura esquemática (adaptado de: ASTM C 941-02); Dir.: montagem efetuada durante a campanha experimental

De modo a avaliar o efeito da depressão ao nível das propriedades reológicas do *grout*, mostra-se na figura 3.7 um *set-up* experimental desenvolvido por Assad e Daou (Assaad, 2015), que consiste na introdução de um viscosímetro no conjunto, cuja haste é inserida no *grout*, permitindo medir em tempo real a evolução da viscosidade aparente, enquanto a mistura perde água.



Figura 3.7 - Set up utilizado para o ensaio, em série, da capacidade de retenção de água e da evolução da viscosidade aparente

O Viscosímetro foi colocado sobre o funil de Buckner, ficando integrado no sistema de vácuo apresentado no ensaio anterior. A vareta foi devidamente posicionada no centro, a sensivelmente 1cm do fundo do funil, acautelando a redução de volume do *grout* durante a saída de água. Este posicionamento é marcado no braço elevatório do reómetro, de modo a permitir elevar a haste entre ensaios, e também, colocar e retirar amostras sem danificar o equipamento.

• Equipamentos

O equipamento necessário a realização do ensaio de retenção de água:

- Proveta graduada;
- Fúnil de Buckner com capacidade para 500ml ;
- Papel de filtro;
- Sistema de ligação entre funil, bomba de vácuo e cilindro;
- Bomba de vácuo, com manómetro digital;
- Suporte metálico suficientemente resistente para suportar o conjunto;

O equipamento necessário à avaliação, em tempo real, do efeito da extração de água com vácuo na viscosidade aparente, só difere do anterior no viscosímetro:

- Viscosímetro Brookfield LV DV-II+PRO (ver fig. 3.7), equipado com uma haste cilíndrica. O equipamento está ligado a um *software* dedicado, Rheocalc, que regista dados de viscosidade, torque e temperatura, durante o tempo de ensaio.

3.9. Caraterização reológica dos *grouts*

A campanha que visa a aferição dos parâmetros reológicos das misturas e a quantificação do escorregamento, foi realizada no CINEMAT, usando para o efeito, o reómetro da gama Bohlin Gemini HR_{nano}, marca Malvern *Instruments*. O reómetro está ligado a um computador que possui o *software* reológico Bohlin Rotational, onde são registados os dados dos ensaios. Esta campanha experimental dividiu-se em duas partes: a primeira envolvendo medições feitas com recurso a uma geometria de face lisa e, a segunda, recorrendo à colagem de uma lixa para dotar a mesma geometria com uma face bastante mais rugosa, de forma a ultrapassar os efeitos do fenómeno de escorregamento. As misturas foram elaboradas no Departamento de Engenharia Civil (DEC - FCT), segundo o método de amassadura descrito anteriormente, tendo início o ensaio no laboratório de reologia do DCM, com 5 minutos de desfasamento. Um ensaio completo, engloba apenas um dos rácios a/l e produz uma medição reológica para cada um dos 4 *gaps* definidos (1, 1,5, 2 e 3mm), tendo uma duração de 40 minutos. A terminologia *gap* provém do Inglês e será utilizada frequentemente em diante, para designar o afastamento entre pratos.

• Procedimento experimental

Um protocolo elaborado pela Malvern Instruments (2012), distribuidora responsável pela produção de reómetros idênticos ao que é aqui utilizado, sugere um ensaio com a aplicação de uma tensão de corte constante, variando os *gaps*, de forma a quantificar o escorregamento. O princípio é simples: se ocorre escorregamento, então a velocidade de escorregamento, V_s , irá depender apenas da tensão de corte aplicada (σ ou τ) e não no *gap*. Em contraste, a diferença de velocidades entre as várias camadas fictícias da amostra, que permite calcular a taxa de corte, será simultaneamente dependente do *gap* e da tensão de corte. Assim, variando o *gap* e mantendo a tensão de corte constante é possível determinar a velocidade de escorregamento e a verdadeira taxa de corte (Malvern Instruments, 2014).

A equação que permite estimar V_s , é apresentada da seguinte forma:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{V}{h} = \frac{2Vs}{h} + \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Onde,

V – Velocidade da placa superior (geometria) (m/s)

$\dot{\gamma}_{app}$ – Taxa de corte medida (s^{-1})

$\dot{\gamma}$ - Taxa de corte real (s^{-1})

Ao representar graficamente a taxa de corte medida $\dot{\gamma}_{app}$, em função do inverso do *gap* ($1/h$), resulta uma recta de declive $2Vs$, cuja ordenada na origem é a taxa de corte real $\dot{\gamma}$.

Para este estudo, optou-se por sujeitar as amostras a um teste com duração de 5 minutos, cuja programação previa a definição de um *gap* e um limite máximo, para a taxa de corte, de $100s^{-1}$. A taxa de corte inicial seria 0 e cresceria, “em escada”, até ao limite imposto, fazendo depois o caminho inverso como mostra a figura 3.8.

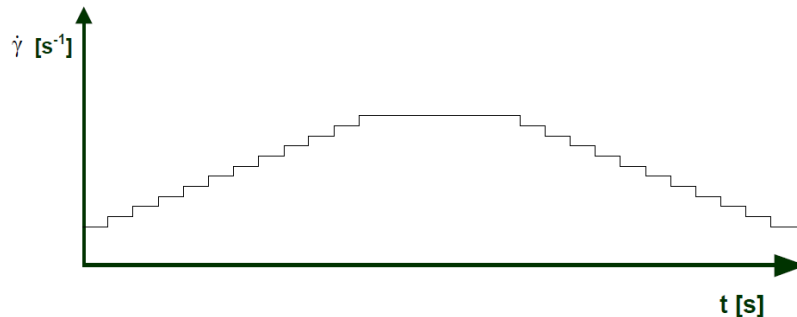


Figura 3.8 - Programação do ensaio em perfil de escada. Representa o desenvolvimento da taxa de corte ao longo do tempo de ensaio (adaptado de: (Piotrowski e Cierniewski, 1982))

Com o programa de ensaio anterior, o *software* retorna dados de tensões de corte e viscosidades, que caraterizam a resposta dos *grouts* às taxas de corte aplicadas. Como foi dito anteriormente, podem construir-se curvas de escoamento, com valores de tensão de corte no eixo das ordenadas e taxas de corte nas abcissas, para os vários rácios a/l e os 4 *gaps* diferentes. Assim como também se obtêm curvas de viscosidade, com as diferentes viscosidades aparentes ($Pa.s$) representadas no eixo das ordenadas, em função das taxas de corte. As curvas de escoamento e os parâmetros reológicos, que delas se retiram, são apresentados em pormenor no capítulo da discussão de resultados, no ponto 4.2.1.

Ao proceder-se desta forma, não se limitou a estimativa do valor da velocidade de escorregamento a uma gama de tensões de corte apenas. Recorrendo às curvas de escoamento,

registam-se os valores das taxas de corte medidas, $\dot{\gamma}_{app}$, para todos os rácios a/l em função de cada valor do gap. Assim, foi possível ajustar a reta descrita pela equação (3.4) e quantificar a velocidade de escorregamento para as tensões de corte de 10Pa, 15Pa e 20Pa. Os gráficos correspondentes a esta análise, são apresentados na seção 4.2.2 (geometria lisa) e 4.2.3.1 (face da geometria com lixa).

De forma a eliminar quaisquer erros decorrentes do processo, além dos já referidos no capítulo anterior (ponto 2.3.6), foram feitas duas repetições para cada mistura, em dias diferentes: iniciando as leituras com o menor gap, e depois começando no maior. Antes da introdução de uma nova amostra no reómetro, é essencial trazer à posição zero o prato superior. A geometria foi, também, criteriosamente passada por água e bem seca, entre cada ensaio. Nos ensaios com lixa, esta foi igualmente limpa com água e utilizada apenas 3 vezes em cada leitura, ou menos, se assim se justificasse. A partir do *software* reológico foi definida a temperatura de 20°C para cada ensaio, de forma a evitar quaisquer perdas de água por evaporação. Antes de qualquer ensaio, as misturas eram agitadas ligeiramente, sempre com o mesmo número de voltas e da mesma forma – movimento de mistura que promovia o refluxo de partículas do fundo até á superfície – para evitar que o assentamento em repouso provocasse alterações significativas nas medições. A quantidade de *grout* colocada no prato foi sempre a mesma: duas colheres para gaps menores e 3 colheres para o de 3mm, para um contato eficaz na interface *grout*-geometria.

- **Equipamentos**

- Reómetro: Bohlin Gemini HR_{nano}, Malvern *Instruments*;



Figura 3.9 - Reómetro rotacional utilizado na caraterização reológica das amostras de *grout*

- *Software* dedicado para leitura de dados: Bohlin Rotational;

- Geometrias: prato superior plano, com um diâmetro de 25mm. A diferença entre rugosidades foi conferida pela colagem de uma lixa, recorrendo a fita-cola;

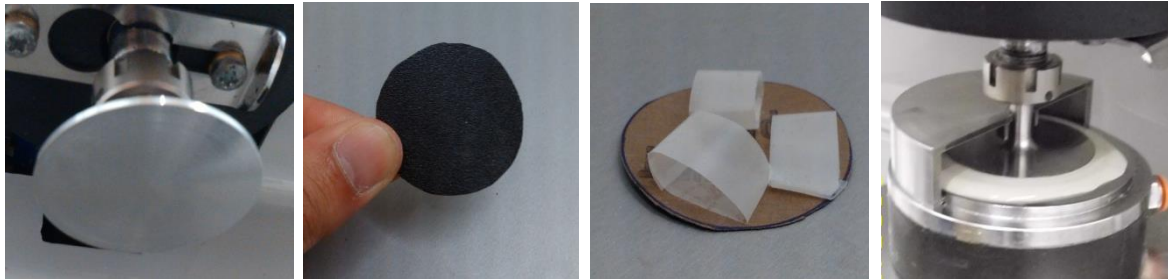


Figura 3.10 - Geometria utilizada durante as medições reológicas e as duas superfícies consideradas: lisa e com lixa

- Ratoeira: usada apenas por questões práticas de limpeza. Esta tampa metálica, dividida em duas partes iguais, evita que o *grout* saia da placa quando são aplicadas taxas de corte mais elevadas;

- Colher plástica: para introdução da amostra no prato inferior (fixo), depois de efetuada a posição zero do *gap*.

- Frascos de plástico rolhados: garantem o transporte das amostras, durante o percurso DEC-DCM, evitando que se evapore alguma água entre medições ao estarem selados.

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1. Caracterização da fluidez, exsudação e retenção de água dos *grouts*

Numa primeira fase da presente discussão, serão apresentados os resultados dos procedimentos experimentais que, de acordo com a ordem cronológica, foram realizados em primeiro lugar. A metodologia usada em cada um desses ensaios encontra-se descrita nos pontos 3.5 a 3.8, do capítulo anterior. É de salientar, que com esta primeira análise, apenas se pretende evidenciar o padrão de comportamento dos *grouts*, face a um incremento ou a um défice da quantidade água na sua composição. Desta forma, é possível compreender a influência direta da água nos parâmetros reológicos, medidos durante os testes posteriores. Não se retiram, portanto, quaisquer conclusões que não tenham sido confirmadas previamente pela bibliografia disponível sobre o tema. Estes dados, visam a construção de uma base sólida para, com maior segurança, se avançarem com as conclusões primordiais do presente trabalho. Essas serão apresentadas no ponto 4.2 deste capítulo, que diz respeito à segunda parte desta discussão de resultados e cuja metodologia experimental se encontra descrita no ponto 3.9.

As propriedades reológicas dos *grouts* são afetadas por vários parâmetros, tais como: o tempo de mistura, o tipo de misturadora, a sequência de adição dos constituintes, o tipo de ligante, o rácio água/ligante (em inglês *w/b*), o tipo de dosagem de superplastificante e outras adições (Baltazar et al., 2013). Analisando os estudos disponíveis sobre a composição de *grouts* (em inglês *grout composition/design*), é relativamente fácil encontrar um consenso entre vários autores, sobre qual a dosagem ótima de superplastificante a utilizar em cada formulação. Entenda-se por ótima, a percentagem de adjuvante que permite uma redução da água de mistura, sem prejudicar a viscosidade, sem introduzir uma floculação forçada nas partículas de ligante e a partir da qual não são perceptíveis ganhos evidentes de fluidez (Roussel e Le Roy, 2005). Encontra-se no capítulo 2, aquando da apresentação dos *grouts* e adjuvantes, uma descrição mais pormenorizada sobre este tema. Tal como no capítulo 3 (ver ponto 3.3), se justifica a dosagem ótima de superplastificante e os rácios a/l selecionados, no ponto de vista deste estudo.

Nos resultados apresentados adiante, optou-se por fixar a dosagem de superplastificante das misturas em 1%. Percentagem que é relativa à massa de ligante. Assim, a massa de cal hidráulica em cada mistura é igualmente fixada, obrigando a que a quantidade de superplastificante esteja sempre na mesma razão de proporção com as partículas suspensas. Ao se bloquearem estes dois constituintes e mantendo as mesmas condições de mistura entre ensaios, isolamos a razão a/l como principal regulador das características do escoamento. Pois, sabendo que, quanto mais dispersas estiverem as partículas, ou quanto maior for a quantidade de partículas de ligante, o resultado é um *grout* com

maior área específica. E, uma maior área específica, incrementa a necessidade de superplastificante para que a viscosidade da mistura se mantenha (Baltazar, Henriques e Jorne, 2012) (Baltazar et al., 2014).

Ora, não havendo possibilidade de modificar a viscosidade da mistura por esta via, a água disponível nos interstícios da suspensão é o único recurso presente com essa capacidade. Apesar de o aumento do rácio a/l ter um efeito, a nível reológico, semelhante ao do superplastificante, principalmente na diminuição do valor da tensão de cedência e da viscosidade plástica, pode ser prejudicial ao comportamento da mistura, aumentando a probabilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade. De seguida, através das variações indicadas na metodologia experimental, referentes à formulação do *grout*, caracteriza-se a fluidez, exsudação e retenção de água, através dos dados obtidos nos ensaios aí indicados, com o objetivo de as correlacionar com a ocorrência do fenómeno de escorregamento (em inglês *slippage* ou *Wall slip*) e o seu efeito nos parâmetros reológicos.

4.1.1. Ensaios de Fluidez

- **Tempo de escoamento (cone de Marsh)**

Este ensaio proporciona uma abordagem simples, quando se pretende estimar a fluidez de uma calda que contém adjuvantes (SP) ou outro tipo de adições (por exemplo: sílica de fumo) (Agulló, Toralles-Carbonari, Gettu e Aguado, 1999). No gráfico seguinte (ver fig. 4.1), optou por se conhecer a influência do rácio de a/l sobre o tempo de escoamento do *grout*. Ao se proceder desta forma, espera obter-se um indicador da sensibilidade da viscosidade, enquanto parâmetro reológico, ao aumento da presença de água na mistura, sem se alterar a dosagem de adjuvante (SP) e de ligante.

Da análise do gráfico (ver fig. 4.1) pode concluir-se, que o aumento da presença de água para misturas mais fluidas ($a/l = 0,50$ e $0,55$), não altera significativamente o tempo de escoamento, havendo um diferencial de apenas 2,3s entre as duas formulações. Efetivamente, como se poderá verificar mais adiante, esta pequena diferença de caudal traduz-se, também, numa pequena disparidade nos valores da viscosidade plástica medida no reómetro, entre estas duas misturas. Para a mistura mais pastosa e a intermédia ($a/l = 0,5$), a diferença entre os tempos de escoamento é de 5s e de 7s para a mais fluida ($a/l = 0,55$). Esta situação pode ser interpretada como uma maior sensibilidade da viscosidade a alterações da quantidade de água, para rácios a/l mais pequenos.

- **Espalhamento**

É um ensaio realizado com o intuito de caracterizar o *grout* do ponto de vista da sua trabalhabilidade e consistência, que são, normalmente, características descritas de forma generalista

pelos artesãos que os aplicam. A trabalhabilidade depende largamente do conteúdo de água e tem uma grande influência na resistência a forças de compressão e de tração, que determinam a qualidade e durabilidade do *grout* no estado sólido (Hanley e Pavía, 2008).

Estabelecendo um paralelismo com o ensaio anterior, representa-se no mesmo gráfico (ver fig. 4.1) a variação dos diâmetros de espalhamento em função dos vários rácios a/l , caracterizando assim, a trabalhabilidade de cada mistura. Como mencionado acima, a água é um fator determinante no diâmetro de espalhamento da calda, uma vez que determina a facilidade com que esta flui inicialmente. Christensen (1991) concluiu, que o diâmetro de espalhamento final era controlado pela tensão de cedência de Bigham, enquanto a viscosidade plástica tinha influência no tempo de escoamento através do cone (Gao e Fourie, 2015).

Pelos resultados apresentados de seguida, poderia ser-se levado a pensar que, as tensões de cedência de cada mistura não estão muito longe umas das outras, uma vez que, entre os rácios que vão desde 0,45 a 0,55, os diâmetros finais sofrem apenas ligeiras alterações. Aumentam em 1,5cm da primeira formulação ($a/l= 0,45$) para a intermédia ($a/l= 0,5$) e 2,7cm entre esta última e a mais fluida ($a/l= 0,55$). Como se verá mais adiante, esta situação não corresponde à realidade, o que permite concluir-se, que a tensão de cedência é um parâmetro reológico bastante sensível à presença de água nos interstícios da calda, tornando-se isto mais evidente à medida que o rácio a/l decresce.

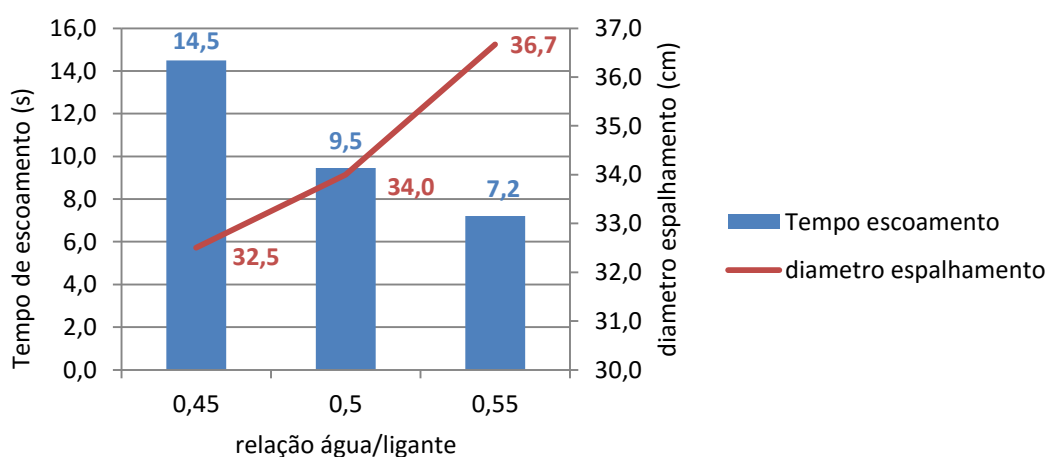


Figura 4.1 - Registo dos tempos de escoamento e diâmetros de espalhamento, em função do rácio a/l

4.1.2. Ensaio de estabilidade

Segundo Miltiadou-Fezans e Tassios, os fatores que controlam a estabilidade das suspensões, são a superfície específica e o rácio água-sólidos. Estes determinam o espaçamento entre partículas e a película de água que se forma à superfície (Miltiadou-Fezans e Tassios, 2012). Esta ascensão de líquido é um indicador da ocorrência de exsudação. Os mesmos autores, citando Papadakis (1959),

referem ainda que, a exsudação aumenta, quase de forma linear, à medida que se incrementa a água na mistura. Nesta seção, mostram-se os resultados obtidos com a realização do ensaio idealizado por V. Rickstal (2000), com vista à caracterização da estabilidade da mistura. Para o efeito, recorre-se a representações gráficas da evolução da percentagem de massa volúmica ao longo do tempo, na zona superficial dos *grouts* em análise.

A observação das curvas descritas pelas misturas mais fluidas (ver Fig. 4.2) - $a/l = 0,5$ e $0,55$ - permite distinguir um comportamento semelhante entre as duas, durante os 60 minutos de leitura, uma vez que os seus valores decrescem continuamente. Apesar de não ser perceptível nos gráficos, à medida que o tempo de ensaio aumenta os valores decrescem a um ritmo mais lento, sendo isto mais evidente perto dos 60 minutos que marcam o final da leitura. Este comportamento poderá ser explicado por um equilíbrio das forças de suspensão, nas quais, o efeito dispersivo do superplastificante pode ter alguma influência, devido à aproximação das partículas em assentamento (Baltazar et al., 2014).

Desta forma, fica definida uma película de água superficial, delimitada pela zona onde o equilíbrio das forças de suspensão é reposto. Como era expectável, na mistura com um rácio $a/l = 0,55$, ocorre um decréscimo mais acentuado na percentagem de massa volúmica inicial da mistura (33%), podendo ser considerada a mais instável das duas. Contudo, apresenta uma variação baixa, se comparada com o rácio $a/l = 0,5$ (quebra de 26%).

A velocidade com que ocorre a quebra de massa volúmica, à superfície das amostras, poderia ser retificada substituindo parte da massa de ligante, por uma adição com partículas mais finas que as de cal, como por exemplo: a sílica de fumo, pois a presença de superplastificante, apenas, não consegue fazer face ao aumento da quantidade de água nos espaços. As misturas fluidas são muito mais sensíveis a este dispersar de partículas, mesmo que pequenas quantidades de água tenham sido adicionadas. Esta combinação de agregados, ainda que em pequenas percentagens, iria dotar as misturas mais fluidas com uma maior área específica e, por conseguinte, maior estabilidade.

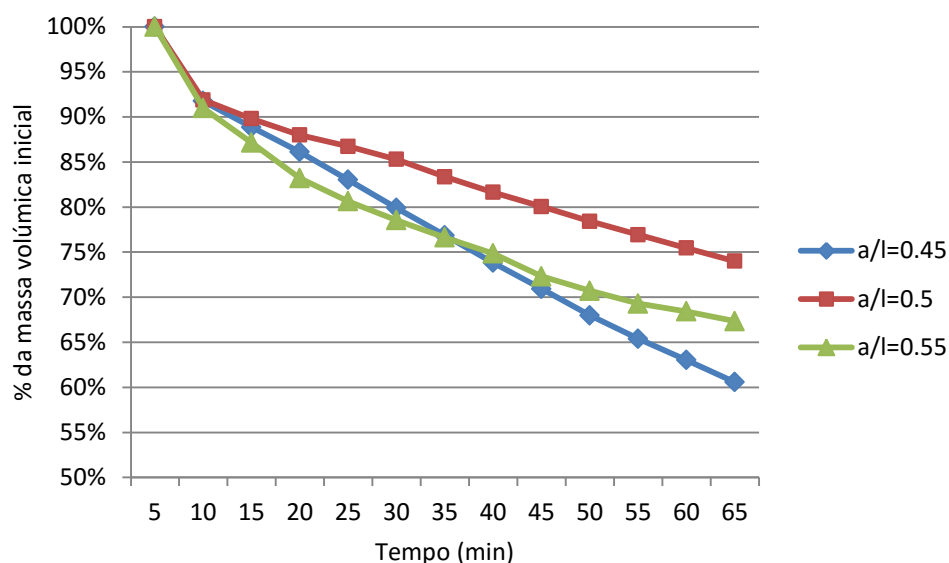


Figura 4.2 - Registo da perda de massa volúmica inicial (%) do *grout*, em função do tempo (ensaio de estabilidade)

Contudo, a linha correspondente ao *grout* de rácio a/l menor ($a/l=0,45$), sugere que este é mais instável que os anteriores, mostrando uma quebra de 28% da sua massa volúmica inicial (ver Fig. 4.2 e 4.3). Como se verá, aqui e mais adiante, nas seções 4.1.3 e 4.1.4, esta situação não é válida.

Rosquët *et al.*, estudaram a instabilidade de *grouts* à base de cimento, em função do seu conteúdo de água. E, de forma semelhante ao ensaio aqui realizado, os estudos acompanharam a evolução da massa volúmica ao longo do tempo e em toda a profundidade do recipiente onde se encontrava a amostra, com recurso a um γ -densiometer bench. Demonstraram, para uma gama de rácios a/c desde 0,4 a 0,45, que a mistura se mantém homogénea e a massa volúmica não varia de forma significativa com o tempo (Miltiadou-Fezans e Tassios, 2013).

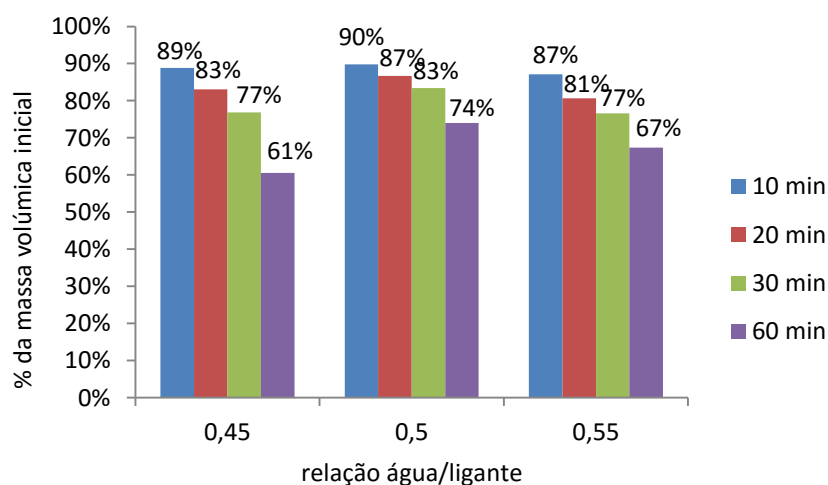


Figura 4.3 - Quebra de massa volúmica inicial (%) do *grout*, em função dos diferentes rácios a/l e para os tempos parciais de: 10, 20, 30 e 60min.

De facto, não é expetável que esta mistura apresente um assentamento de partículas mais acelerado que as anteriores, pois a sua consistência pastosa não o permite. Esta observação pode ajudar a explicar o seu comportamento. Ao se inserir a esfera no início do ensaio, o *grout* é “obrigado” a afastar-se, criando um vazio, que devido à sua viscosidade elevada, não é instantaneamente preenchido por *grout*. Ao invés, esse espaço vai sendo ocupado por água livre. A água livre de mistura pode ser definida como o líquido intersticial, retido fisicamente entre o material e que não participa quimicamente no processo de hidratação (Assaad, 2015).

Assim, como a concentração de partículas junto à esfera é muito baixa, traduz-se numa quebra repentina e contínua da massa volúmica, a partir do momento em que se insere a esfera no *grout*. Esta situação pôde ser registada ao se retirar a esfera do recipiente, distinguindo-se perfeitamente a sua vizinhança rodeada por água e o vazio deixado, devido à consistência da amostra (ver fig. 4.4).



Figura 4.4 - Sequência da retirada da esfera metálica do *grout* mais pastoso ($a/l = 0,45$), que permite identificar a sua vizinhança rodeada por água e o vazio deixado no seu lugar

4.1.3. Ensaio de retenção de água

Os *grouts* devem possuir uma adequada retenção de água, para minimizar o efeito da extração de água livre da mistura, que irá afetar drasticamente as suas propriedades no estado fresco e endurecido (Assaad, 2015). Outra forma de caraterizar a estabilidade da mistura é através do ensaio de retenção de água, que simula as condições do meio poroso no qual o *grout* é injetado e que condiciona fortemente a sua capacidade de reter a água de mistura. De modo a reproduzir o efeito de sucção exercido pelo interior de uma alvenaria muito seca, ou composta por materiais porosos com elevada capacidade de sucção capilar, submeteu-se o *grout* a um ensaio que traduzisse essa mesma capacidade de sucção (Cardoso, John, Pileggi e Banfill, 2014).

Para a mesma quantidade de água recolhida na proveta graduada, compreende-se claramente, que a relação a/l tem uma influência direta no tempo extração. Quanto menor for esse rácio, mais demorada é a saída de água. Apesar desta tendência, a mistura intermédia ($a/l = 0,50$) apresenta um tempo aceitável de retenção, comparativamente à de maior estabilidade ($a/l = 0,45$). Por outro lado,

para uma relação a/l de 0,55, a retenção de água fica muito abaixo dos valores registados nas misturas anteriores, como se pode observar na figura 4.5, podendo mesmo ficar aquém dos requisitos de estabilidade exigidos.

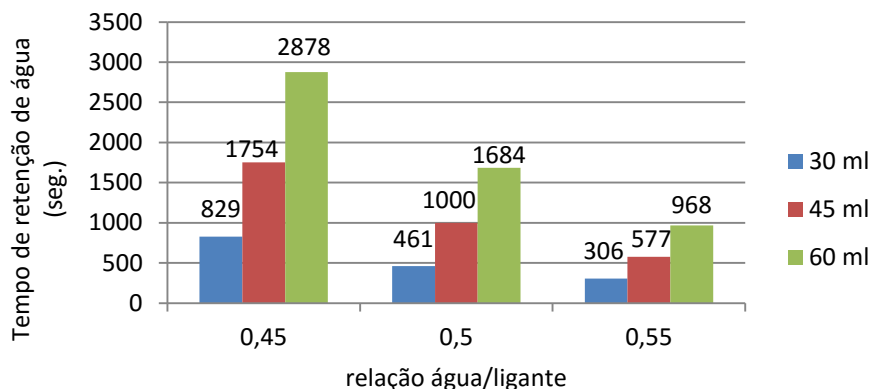


Figura 4.5 - Registos dos tempos de retenção de água dos grouts submetidos a uma depressão, em função do rácio a/l e para três volumes parciais (30, 45 e 60ml)

Sabendo o volume do funil de Buckner, utilizado durante a realização do ensaio, a capacidade de retenção de cada mistura pode ser comparada de forma quantitativa. Convertendo a quantidade de água extraída numa percentagem de exsudação, para um determinado intervalo de tempo:

$$\text{exsudação (\%)} = \frac{\text{Água extraída durante o intervalo de tempo } x \text{ (ml)}}{a/l \times 500\text{ml}} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde, o volume de 500ml corresponde à quantidade de *grout* suportada pelo funil de Buckner e x os intervalos de tempo de 5 (300s), 10 (600s) e 15min (900s).

- $a/l = 0,45$: perde 4,82% de água nos primeiros 5min do ensaio, acumulando perdas de 9,65% aos 10min e 12,34% quando o cronómetro marca 15min. As percentagens aqui apresentadas perfazem um total de, aproximadamente, 28ml.

- $a/l = 0,5$: 7,81% de água são perdidos em 5min, demorando 10min para que sejam drenados 12,18%. Aos 15min registam-se 16,54% de água extraída. O total extraído foi de aproximadamente 41ml.

- $a/l = 0,55$: em 5min perde os 10,70% de água iniciais, com mais 5min passados perde 16,83%, drenando 20,90% ao fim de 15min. No total contam-se quase 58ml de água drenada.

Em todas as formulações é notória uma maior perda de água durante os primeiros minutos do ensaio. Pode significar que este é um período crítico nas condições de injeção, quer seja devido à

pressão de vácuo aplicada, quer devido à capacidade de absorção dos materiais do interior da alvenaria.

4.1.4. Viscosidade aparente Vs. Retenção de água

A quantificação em tempo real da variação da viscosidade, em função da quantidade de água extraída da amostra, tem especial interesse na avaliação da fluidez dos *grouts* sujeitos a operações de injeção. Assad e Daou (Assaad, 2015) sugeriram a monitorização da viscosidade aparente, através da disposição em série de dois ensaios diferentes. O *set-up* idealizado e os princípios base do ensaio estão descritos na secção 3, do capítulo 3.8.

Na figura 4.6 estão representadas, simultaneamente e em função do tempo, as curvas de evolução da viscosidade aparente, η_a , assim como a quantidade de água extraída. É fácil compreender que, tal como era esperado, o aumento observado nos valores de η_a , pode ser diretamente atribuído à quantidade de água extraída da amostra, durante o tempo em que é lhe aplicada a sucção. A saída forçada de água, obriga a uma aproximação das partículas sólidas, que começam a colidir com mais intensidade. A crescente fricção interna, conduz a um aumento do valor da tensão que é necessário continuar a aplicar ao *grout*, para que o escoamento continue a verificar-se (Assaad, 2015).

A mistura considerada mais instável nos procedimentos experimentais anteriores ($a/l = 0,55$) continua a confirmar essa tendência. Tendo ao longo deste ensaio, experimentado uma mudança de viscosidade de $0,25 - 5,7 [Pa.s]$. No entanto, é de assinalar, que esta mudança brusca nos valores de η_a , se verifica quando já tinha sido induzida uma drenagem de $0,40ml$, ou seja, próximo do limite de $60ml$ definido para o ensaio. Não obstante, esta mistura continua a perder a quantidade de água estabelecida muito rapidamente ($16min$), em comparação às restantes. A mesma observação pode ser feita para a mistura com um rácio $a/l = 0,5$, pois o ponto em que o valor da viscosidade “dispara”, também ocorre quando se extraem, sensivelmente, $40ml$ de líquido. A diferença para este caso, é um intervalo de valores de η_a que varia entre $0,7 - 3,6 [Pa.s]$ e um maior tempo de retenção ($28min$). A linha pertencente à mistura com o rácio a/l mais baixo, demonstrou uma retenção de água bastante alta, com uma variação de viscosidade aparente pouco considerável: $1-1,5[Pa.s]$, com o tempo de extração a atingir os $48min$.

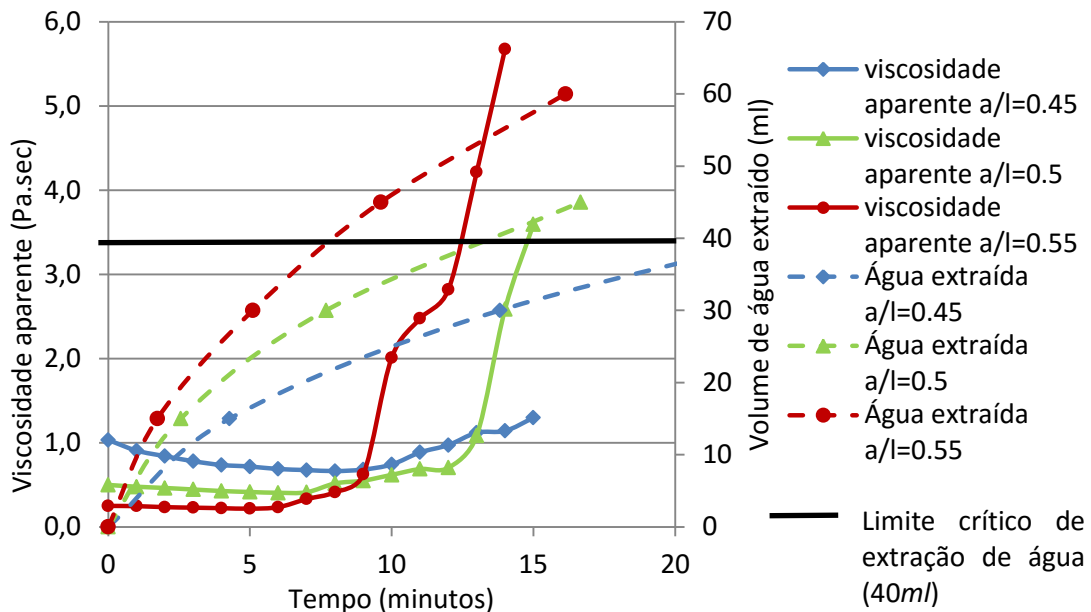


Figura 4.6 – Avaliação, para os diferentes rácios a/l , da variação da viscosidade aparente, em função da perda de água

Estas conclusões adicionais são relevantes, na medida em que, nos permitem prever a capacidade de penetração do *grout* no meio poroso das alvenarias sabendo, exatamente, qual a quantidade crítica de água que este pode perder, em detrimento da sua fluidez, durante o tempo de injeção.

4.2. Análise do fenómeno de escorregamento nas medições reológicas dos *grouts*

4.2.1. Comportamento reológico do *grout*

No início desta secção, mostram-se as curvas de escoamento de *grouts* com uma percentagem de água em relação à massa de ligante, de 50% e 45% respetivamente ($SP=1\%$ e gap entre as placas do reómetro de $2mm$ e uma temperatura do prato constante de $20^\circ C$). O seu comportamento reológico evidencia uma forte propensão reofluidificante, indo de encontro ao documentado na bibliografia consultada. O ajuste entre os valores medidos e a equação que caracteriza teoricamente os parâmetros reológicos (τ_0, η e τ), é feito através da equação de Bingham modificada. Por simples observação, depreende-se que um ajuste pelo modelo de Bingham não descreveria com rigor o troço inicial das curvas. Seriam, pois, negligenciados valores de tensões de corte (τ) mais baixas, para uma gama de taxas de corte ($\dot{\gamma}$) de $0-10 (s^{-1})$, aproximadamente. Segundo Viet-Hung Nguyen, ao proceder dessa forma perante um *grout* reofluidificante, estar-se-ia a sobrestimar a tensão de cedência (τ_0) (Nguyen, Remond e Gallias, 2011).

Através da curva de ajuste aos pontos do gráfico da figura 4.7, obtém-se a equação seguinte:

$$y = -0,0017x^2 + 0,333x + 2,671 \quad (4.2)$$

A partir desta equação, é possível conhecer os vários parâmetros reológicos, nomeadamente a tensão de cedência e viscosidade plástica, de $2,671Pa$ e $0,333Pa.s$ respetivamente. Estes resultados podem ser avançados com uma precisão de 96%, para este caso.

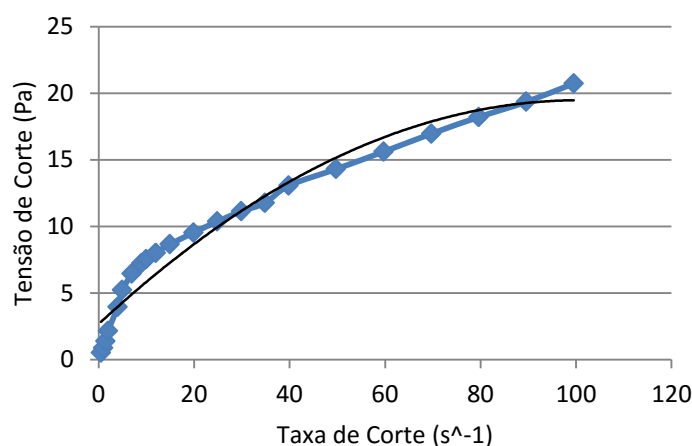


Figura 4.7 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,5$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham modificado

Da mesma forma, retiram-se informações semelhantes da figura 4.8: $\tau_0 = 9,466Pa$ e $\eta_p = 1,20Pa.s$. Aqui, a regressão descreve o comportamento reológico com uma precisão de 97%.

Com base nos valores indicados, é possível quantificar reologicamente a influência da quantidade de água nas misturas. Da formulação de rácio $a/l = 0,45$ para a de 0,5, propriedades como a tensão de cedência e a viscosidade plástica, vêm o seu valor reduzido em quatro vezes, aproximadamente. Deve-se principalmente, ao aumento de água livre nos interstícios que promove uma maior lubrificação e trabalhabilidade.

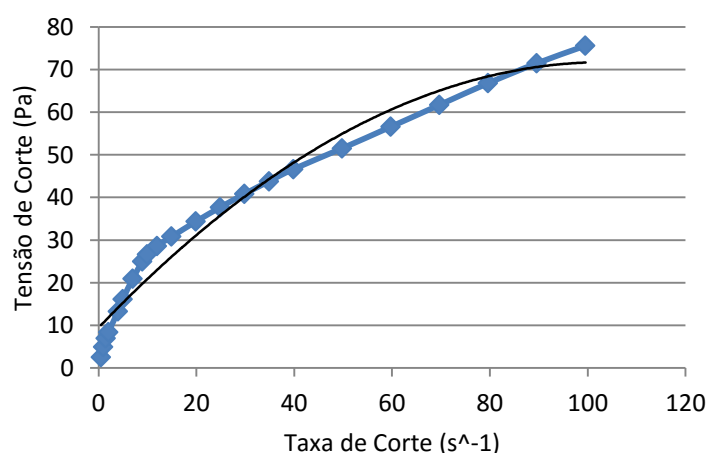


Figura 4.8 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,45$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham modificado

Nas curvas de fluxo anteriores, é clara a existência de dois troços distintos, caracterizados por diferentes declives. O primeiro troço é caracterizado por taxas de corte mais baixas, com um limite próximo de 10s^{-1} . Deste ponto em diante, ocorre uma mudança na resposta do fluido às taxas de corte mais altas, marcando o início do segundo troço. Por questões de demonstração, mostram-se na figura 4.9, valores pertencentes à curva de fluxo anterior (ver fig. 4.8), à qual, neste caso, se retirou o troço inicial. Foi-lhe posteriormente ajustada uma equação de Bingham. Como seria de prever, retira-se que a tensão de cedência é superior, em cerca de duas vezes e meia ($24,13\text{Pa}$), mas a viscosidade plástica vê o valor reduzido para $0,533\text{Pa.s}$:

$$y = 0,5328 x + 24,129 \quad (4.3)$$

A redução no valor da viscosidade plástica pode ser explicada pelo comportamento reofluidificante do *grout*. A eliminação das taxas de corte mais baixas, não tem em conta o estado de maior coesão entre partículas. Assim, ao se iniciar a leitura para este caso, a mistura já experimentou uma agitação significativa, uma maior dispersão e, consequentemente, uma diminuição da viscosidade plástica.

Sublinha-se no entanto, que ao se desprezarem os valores de taxas de corte mais baixas, a tensão de cedência vê o seu valor ainda mais inflacionado. É, portanto, reforçada a hipótese de uma aparente sobrestimação deste parâmetro quando se utiliza o modelo de Bingham para a descrição do escoamento. Na realidade, o que está a ocorrer é uma consequência do escorregamento, pois comparando os valores apresentados na secção 4.2.3.2., pode concluir-se, através da comparação dos valores da tensão de cedência obtidos com e sem lixa na face do prato rotacional, que ocorre uma subestimação.

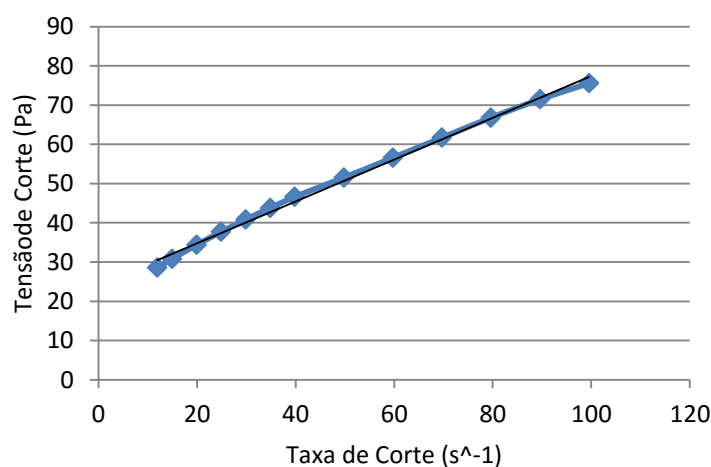


Figura 4.9 - Curva de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,45$, com uma reta de ajuste aos valores do gráfico, segundo o modelo de Bingham e sem o troço inicial de maior variação dos valores de tensão

Nos gráficos seguintes (ver fig. 4.10 a 4.12) é possível mostrar, que os parâmetros reológicos enumerados anteriormente, variam não só com a alteração da relação a/l , mas também com os diferentes *gaps* aplicados durante os ensaios. Para este fim, é apresentada uma série de gráficos, nos quais é indicado o valor da tensão de cedência e da viscosidade plástica, em função do rácio a/l . O efeito da variação do tamanho do gap é destacado, compilando para cada rácio a/l , a evolução dos valores da τ_0 e da ηp , com os vários afastamentos (1, 1,5, 2 e 3mm). Autores como Nehdi, testemunharam um comportamento semelhante, por parte das pastas de cimento (Nehdi e Rahman, 2004). De forma a compreender melhor estes fenómenos e os descritos na seção anterior, a ordem de apresentação desta informação seguirá a mesma lógica. Apresentam-se em primeiro lugar os resultados segundo a equação de Bingham modificada, abrangendo toda a gama de taxas de corte. Depois, a equação de Bingham para todas as taxas de corte e, finalmente, esta mesma equação, ignorando as taxas de corte mais baixas.

Na figura 4.10, é francamente notória a influência do gap na determinação da tensão de cedência. Quando é aplicado um gap de 1mm entre as placas, para as três dosagens de água diferentes, a tensão de cedência é praticamente inexistente. À medida que o gap é aumentado, observa-se um crescimento significativo deste parâmetro. Este efeito tem maior destaque para o *grout* menos fluido ($a/l = 0,45$): tendo um crescimento de 1 para 6Pa, com um aumento do gap de apenas 0,5mm, crescendo mais 5Pa, aproximadamente, nas seguintes leituras. O efeito do gap tem menor impacto para as misturas mais fluidas ($a/l = 0,5$ e $0,55$), onde os valores se apresentam mais constantes. A viscosidade plástica, como seria de esperar, é claramente superior nas misturas menos fluidas, mostrando relativa estabilidade aquando da alternância de gaps. A viscosidade plástica dos restantes *grouts* é muito semelhante, em valor e em comportamento, decrescendo à medida que o afastamento entre pratos aumenta.

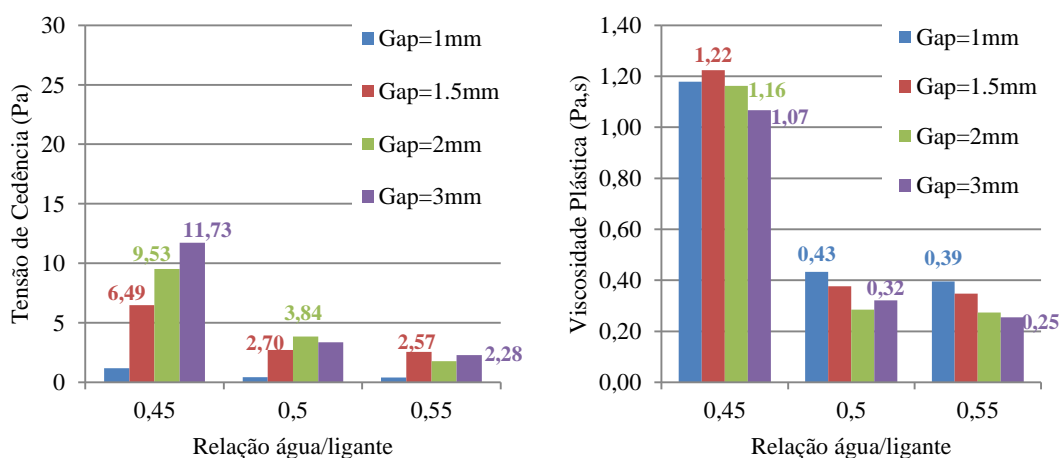


Figura 4.10 - Viscosidade plástica e tensão de cedência, descritos pela equação de Bingham modificada, para diferentes dosagens de água e *gaps* entre placas de medição

Comparando os gráficos seguintes (ver fig. 4.11 e 4.12), é evidente a consequência de se optar por utilizar um ou outro modelo, na obtenção da tensão de cedência em misturas menos fluidas ($a/l=0,45$). No que respeita a este parâmetro reológico pode concluir-se que, ao ocorrer escorregamento, a tensão de cedência estimada estará longe do seu valor real. Para as misturas mais fluidas ($a/l=0,5$ e $0,55$) as diferenças entre os modelos de ajustamento matemático também são assinaláveis, com variações de valores que chegam a rondar os 50%.

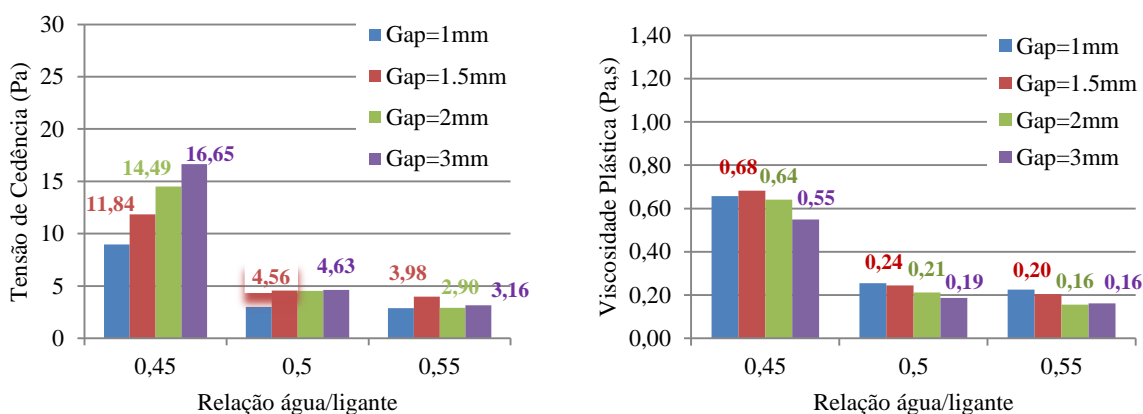


Figura 4.11 – Tensão de cedência e viscosidade plástica descritas pela equação de Bingham (todos os valores de tensão), para diferentes dosagens de água e para os vários gaps

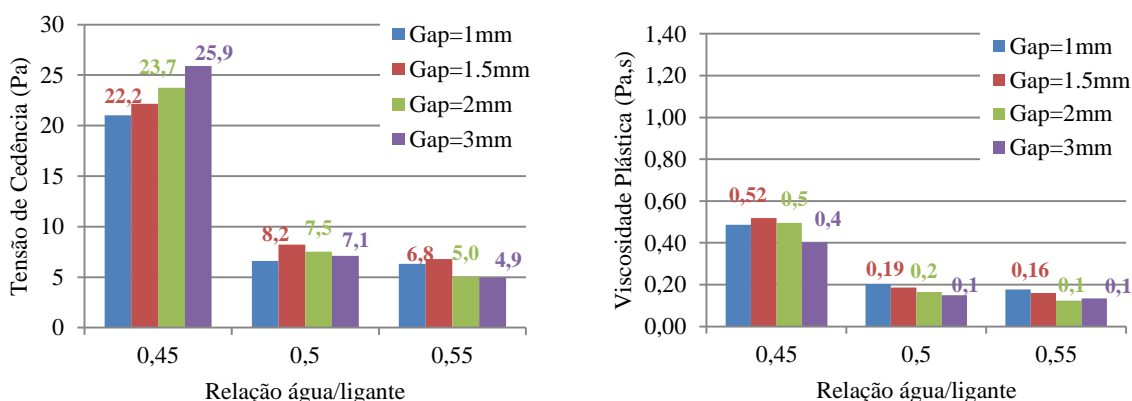


Figura 4.12 - Tensão de cedência e viscosidade plástica descritas pela equação de Bingham (sem valores de tensão iniciais), para diferentes dosagens de água e para os vários gaps

4.2.2. Quantificação do escorregamento em função do gap, tensão de corte e rácio a/l

Segundo o princípio introduzido anteriormente na seção 3.9, através da apresentação dos valores medidos da taxa de corte em função do valor do inverso do gap, é possível estimar a velocidade do escorregamento. Para isso, fez-se uma regressão linear desses dados, cujo declive representa duas vezes a velocidade de escorregamento ($2.V_s$ – slip velocity [mm/s]) e a ordenada na origem corresponde à taxa de corte real.

Na figura 4.13, são então representados os valores medidos da taxa de corte para um *grout* de rácio $a/l = 0,45$, sobre o inverso dos diferentes gaps usados para as medições. É possível observar pela equação das retas que, neste caso, a velocidade de escorregamento é quantificada como: 2.2mm/s , 3.8mm/s e 5.2mm/s . Estes valores correspondem a taxas de corte reais de $0,7\text{s}^{-1}$, $1,4\text{s}^{-1}$ e $1,7\text{s}^{-1}$ para as tensões de corte aplicadas de 10Pa , 15Pa e 20Pa , respetivamente. Graficamente é de notar, que para cada uma destas tensões de corte, está associada uma gama de taxas de corte medida ao longo do ensaio, que varia entre 2s^{-1} , 4s^{-1} e 5s^{-1} . Uma vez que, os valores reais são substancialmente menores que os medidos, pode-se afirmar que ocorre um grau significativo de escorregamento.

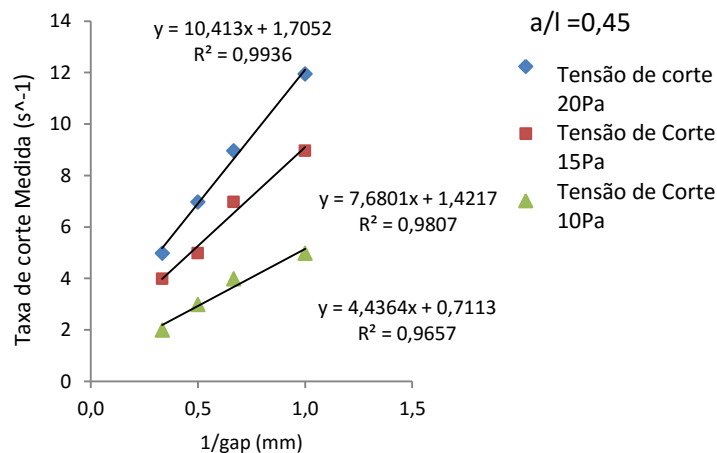


Figura 4.13 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l = 0,45$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e 20Pa)

Nas figuras seguintes, podem observar-se os valores da taxa de corte V vs. o inverso do *gap* em falta, nomeadamente as de rácio $a/l = 0,50$ (ver fig. 4.14) e $0,55$ (ver fig. 4.15). Na figura 6.14, é notório que para a tensão de corte mais baixa, de 10Pa , a reta de ajustamento apresenta um declive nulo, o que significa uma ausência de escorregamento. Para as gamas de tensão seguintes, de 15 a 20Pa , a velocidade de escorregamento acompanha o aumento da tensão de corte. No entanto, é de salientar que para a tensão de 15Pa o escorregamento só se faz sentir na medição feita com o *gap* maior (3mm). Ao passo que, para 20Pa , ocorre a partir de um *gap* de 2mm .

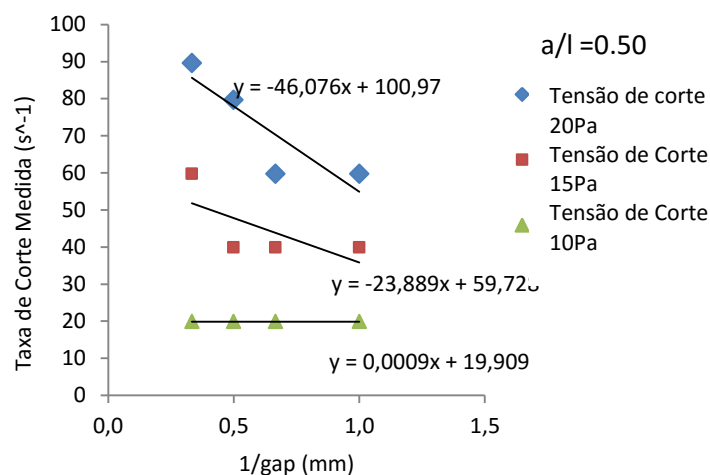


Figura 4.14 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l=0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e 20Pa)

Para a última formulação, $a/l=0,55$, seguindo a tendência anterior, pode concluir-se que a velocidade de escorregamento aumenta com tensões de corte mais altas. Observa-se ainda, que os declives das retas de ajuste, à medida que a quantidade de água aumenta, vão ficando cada vez mais negativos. Outro dado que se revela determinante em *grouts* mais fluidos é o tamanho do *gap*, pois para estados de tensão de corte elevados, o gradiente de velocidades aumenta com esse afastamento. Situação que pode ser atribuída ao aumento do escorregamento, à medida que se aumenta o *gap*.

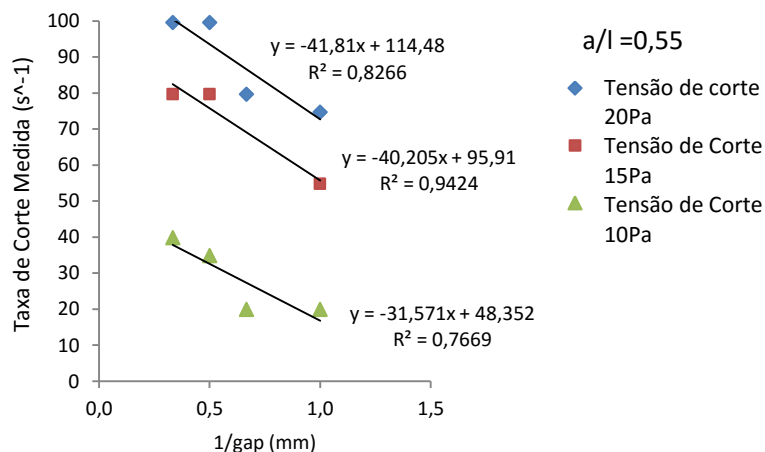


Figura 4.15 - Quantificação do escorregamento (geometria de face lisa) para a mistura de rácio $a/l=0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e 20Pa)

As mudanças de declive ocorridas com o aumento do rácio a/l , podem ajudar a perceber a influência do escorregamento na determinação dos parâmetros reológicos. Para o *grout* que contém a menor quantidade de água ($a/l=0,45$), sendo o declive positivo, significa que o escorregamento, para as diferentes tensões de corte, poderá levar a medições de taxas de corte superiores às efectivamente impostas à amostra. Pela caracterização feita anteriormente deste *grout* sabe-se, que das misturas ensaiadas, é o que apresenta maior viscosidade e retenção de água, ou seja, pouco espalhamento e

menor propensão para exsudação. Com efeito, a ligação na interface geometria-*grout* apresenta pouca aderência, devido à homogeneização e uma distribuição de partículas muito regular e pouco espaçada, em contato com uma superfície muito polida. Implica, por isso, pouca trabalhabilidade e inércia de transmissão do movimento giratório em profundidade, entre as camadas fictícias de fluido. Situação que é traduzida pelas taxas de corte medidas (*Measured shear rate* [s^{-1}]) e representadas na figura 4.13, que abrangem uma gama de valores muito baixa – 2 a $12s^{-1}$ - em comparação com as formulações mais fluidas – 10 a $100s^{-1}$ - ao serem aplicadas diferentes tensões de corte.

Assim, a tensão de corte que o reómetro regista no início do escoamento, poderá ser mais baixa do que a necessária na realidade. Não sendo, por isso, avaliada rigorosamente a tensão de cedência. Esta conclusão poderá fazer mais sentido observando que, à medida que o *gap* diminui, as partículas sofrem uma extensão radial provocada pela descida da geometria, depositando-se na periferia da amostra. O défice de homogeneização induzido, pode mesmo provocar uma separação parcial da interface *grout*-geometria, ao ocorrer o movimento giratório durante a leitura, devido à sua falta de fluidez. A figura 4.16, apresenta uma amostra de rácio $a/l= 0,45$, depois de ensaiada para um *gap* de 1mm e de 3mm, de forma a ilustrar a explicação anterior.



Figura 4.16 - Diferenças entre mostras com rácio $a/l= 0,45$, depois de ensaiadas com um *gap* de 1mm (esq.) e 3mm(dir.)

Para os rácios $a/l= 0,5$ e $0,55$, as partículas destes *grouts* têm tendência a assentar mais rapidamente, mediante as razões já conhecidas e descritas no ponto 4.1. Para *gaps* de maior dimensão, este afastamento de partículas da superfície, deixa uma película de água na interface geometria-*grout*. Desta forma, a superfície da geometria de leitura exerce a tensão de corte numa camada que não representa eficazmente o comportamento reológico da amostra. Assim, à medida que o *gap* diminui, passa-se de uma situação onde o escorregamento tem maior influência, para uma, onde pela proximidade das placas, a superfície da geometria tem maior contato com as partículas de *grout*, dissimulando o efeito da exsudação. A exceção poderá ser quando o *gap* é de 1mm. Devido à reduzida viscosidade do *grout*, as partículas possuem mobilidade suficiente para se espalharem facilmente pelo

prato do reómetro, podendo sofrer um afastamento radial provocado pelo movimento rotacional da geometria. Assim, há a possibilidade de não regressarem ao centro da amostra, ocorrendo maior escorregamento devido a uma maior presença de água. Estudos anteriores, baseados em medições reológicas, mostraram resultados semelhantes para pastas de cimento. Barnes (1995) relata o fenómeno como uma camada rica em água que facilita o escoamento e que não representa o material como um todo. (Saak et al., 2001)

Esta situação é ilustrada na figura 4.17, onde são representadas amostras de rácio $a/l = 0,55$, ensaiadas para gaps de 1mm e 2mm , respetivamente.

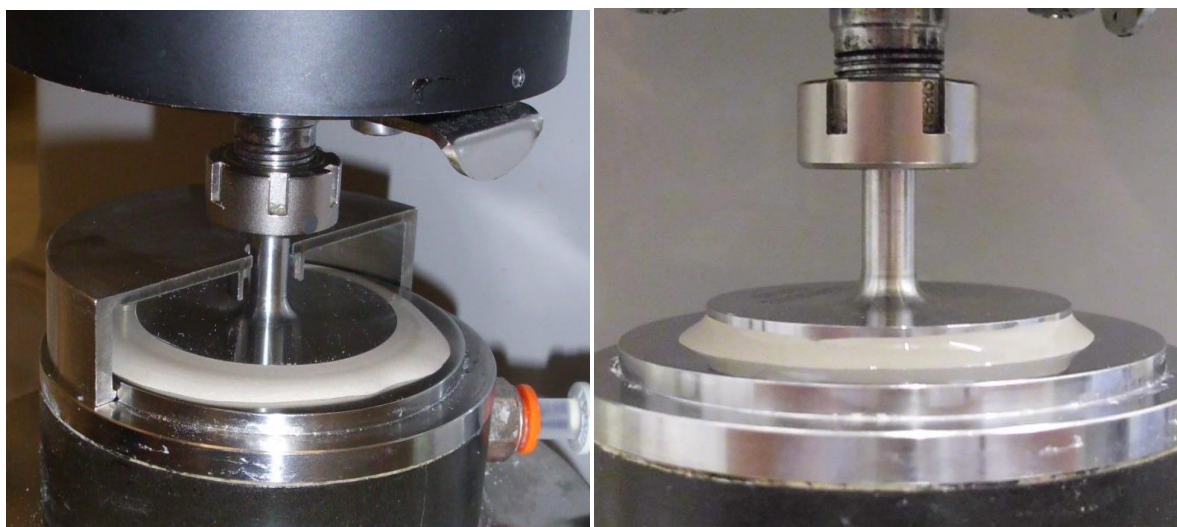


Figura 4.17 - Diferenças entre mostras com rácio $a/l = 0,55$, depois de ensaiadas com um *gap* de 1mm (esq.) e 3mm (dir.)

4.2.3. Alteração da rugosidade das geometrias

A alteração da rugosidade da geometria, com recurso à colagem de uma lixa na face lisa, conduziu à obtenção de resultados bastante interessantes, do ponto de vista reológico. Devido à impossibilidade de efetuar os ensaios com uma superfície serrada, como é recomendado pelo protocolo da marca que produz o reómetro – Malvern Instruments – optou-se por uma solução mais económica e igualmente válida, de forma a eliminar os efeitos do escorregamento quantificado anteriormente.



Figura 4.18 - Alteração da rugosidade da geometria, com recurso à colagem de uma lixa (dir.) na face lisa (esq.)

4.2.3.1. Quantificação do escorregamento – geometria com lixa

Numa primeira comparação, pode observar-se que as tensões de corte aplicadas pelo reómetro para o caso em que $a/l = 0,45$, são muito superiores às definidas anteriormente. Aquando dos ensaios efetuados com a geometria lisa, devido ao escorregamento ocorrido na interface geometria-grout, era possível o prato rodar facilmente – mesmo que fosse numa camada de *grout* mais fluida, originada por esse mesmo movimento giratório, e que conduzia a uma concentração de partículas na periferia da amostra – mas, devido à introdução de maior atrito na interface, conduz à situação contrária. Como a aderência entre a lixa e as partículas do *grout* é melhorada, a transmissão das tensões de corte em profundidade obriga a um estado de tensão maior entre as camadas fictícias de fluido, devido à rigidez desta formulação. A gama de tensões passa, então, de 10-15Pa para 80-130Pa. Para a primeira gama de tensões o valor do escorregamento é nulo, o que está dentro do expetável para uma mistura que é bastante estável e com baixa propensão para ocorrência de exsudação. Para as gamas seguintes, 100Pa e 130Pa, a velocidade de escorregamento “dispara” devido à divergência entre as taxas de corte medidas e a taxa de corte real, tendência que também é acompanhada pela diminuição do *gap*.

Assim, quando o *gap* é maior, devido à elevada tensão de corte, o prato gira numa camada superficial de grout menos consistente, criando uma depressão onde pode girar com maior facilidade, ocorrendo escorregamento – registam-se, portanto, taxas de corte mais elevadas. À medida que as placas estão mais próximas, existe uma maior colisão entre as partículas, devido à presença da lixa, que obriga a que essas permaneçam no centro da amostra, o que se traduz na leitura de taxas de corte muito menores às dos gaps anteriores. Sakk *et al.* (Saak et al., 2001) alertam para o facto de a lâmina de escorregamento ser menor quando a concentração de partículas é maior, mas o efeito do escorregamento tornar-se muito mais proeminente. Estas observações podem, também, explicar a alteração do declive das retas, que representam o ajuste feito aos valores do gráfico seguinte.

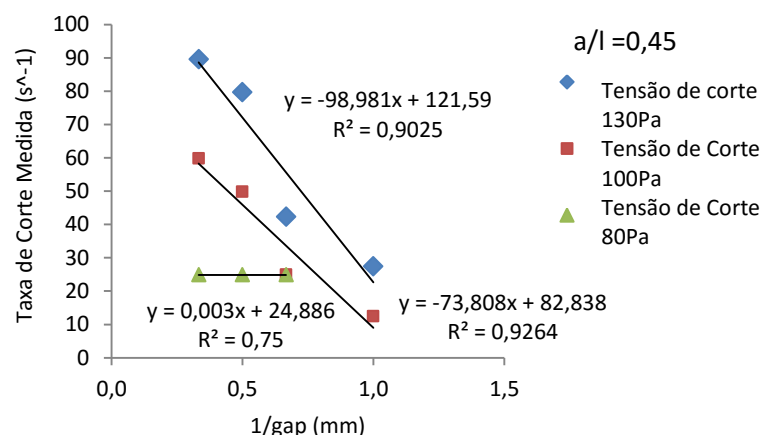


Figura 4.19 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,45$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (80, 100 e 130Pa)

A formulação intermédia, cujo rácio $a/l = 0,50$, apresenta melhoramentos muito significativos no que diz respeito aos valores da velocidade de escorregamento. Para as gamas de tensão de corte iniciais, 10Pa e 15Pa, o escorregamento é inexistente. À semelhança do que ocorreu na primeira fase deste procedimento, o escorregamento só foi evidente ao ser aplicada uma tensão de corte de 20Pa e com o gap de 2mm e 3mm. Ainda assim, foi possível diminuir o impacto da velocidade de escorregamento em cerca de 50% na gama de tensões de corte de 20Pa. Esta observação realça a dependência da estabilidade da mistura em função da quantidade de água, que para rácios a/l e valores de *gap* maiores, faz com que os *grouts* experimentem um incremento da velocidade de escorregamento à medida que a tensão de corte aumenta. Estas evidências permitem concluir que, além de o escorregamento exercer uma influência sobre os parâmetros reológicos, mais pronunciada para valores de tensão próximos das da tensão de cedência (Barnes, 1995; Saak, 2000), para misturas mais instáveis, o escorregamento também pode levar a uma subestimação dos valores da tensão de cedência e da viscosidade plástica, para valores de tensão e taxas de corte mais elevados.

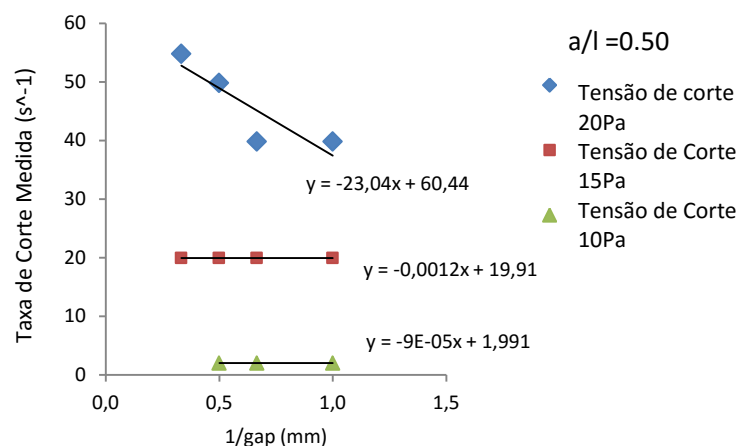


Figura 4.20 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,5$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e 20Pa)

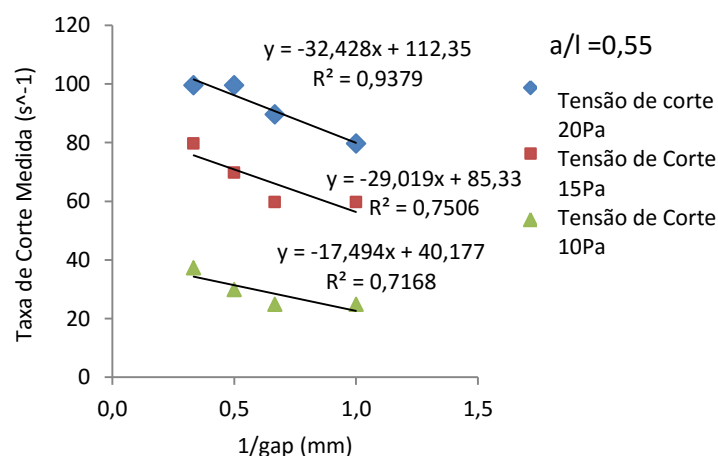


Figura 4.21 - Quantificação do escorregamento (geometria de face rugosa) para a mistura de rácio $a/l = 0,55$, para diferentes gamas de tensão aplicadas (10, 15 e 20Pa)

As figuras seguintes, representam as curvas de escoamento obtidas para os vários rácios a/l e para os diferentes gaps, com recurso à geometria com lixa (temperatura do prato constante de 20° C). Pela sua observação, denota-se uma uniformização do comportamento das curvas, não evidenciando uma alteração significativa da resposta do *grout* à medida que aumenta a taxa de corte, ou seja, não se observa o troço inicial de declive mais acentuado, característico das curvas de escoamento resultantes da medição com o prato liso. Esta diferença pode ser atribuída diretamente à introdução da rugosidade na geometria, que impede que o seu movimento rotacional, para taxas de corte mais baixas, seja afetado da mesma forma pelo escorregamento na interface geometria-*grout*. A reta de ajuste representada nas figuras 4.22 a 4.24, tem um desenvolvimento polinomial que obedece ao modelo de Bingham modificado. Este modelo descreve o desenvolvimento com uma precisão de 99% para a mistura menos fluida ($a/l = 0,45$), à exceção da curva correspondente ao gap de 3mm, atingindo os 98%.

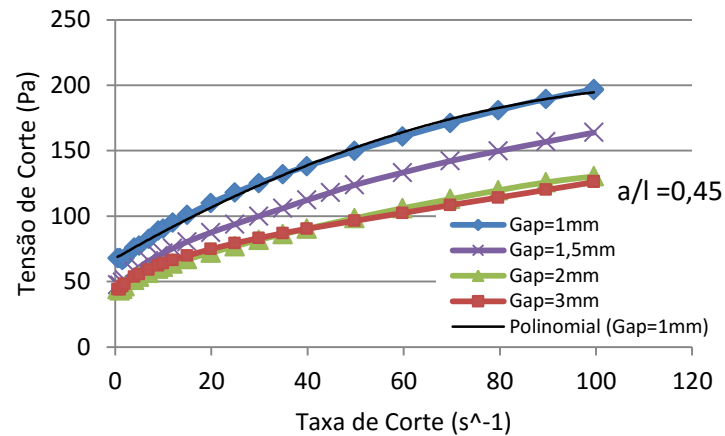


Figura 4.22 - Curvas de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,45$, representadas para os diferentes *gaps* de medição (geometria de face rugosa; temperatura do prato constante de 20°C)

Para uma formulação intermédia ($a/l = 0,5$) o ajuste é quase perfeito em todos os *gaps*, chegando mesmo a atingir 99,9% quando o *gap* é de 1,5mm. Este melhoramento poderá ser explicado pela estabilidade mostrada por esta formulação ao longo de toda a campanha experimental.

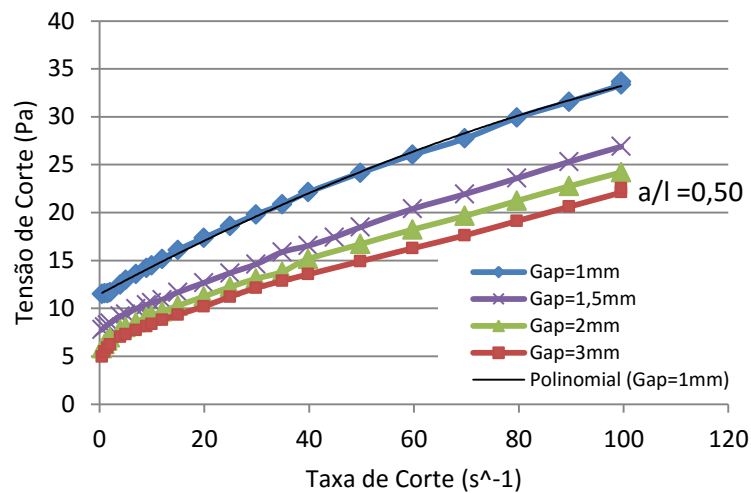


Figura 4.23 - Curvas de escoamento para um grout de rácio $a/l = 0,5$, representadas para os diferentes *gaps* de medição (geometria de face rugosa; temperatura do prato constante de 20°C)

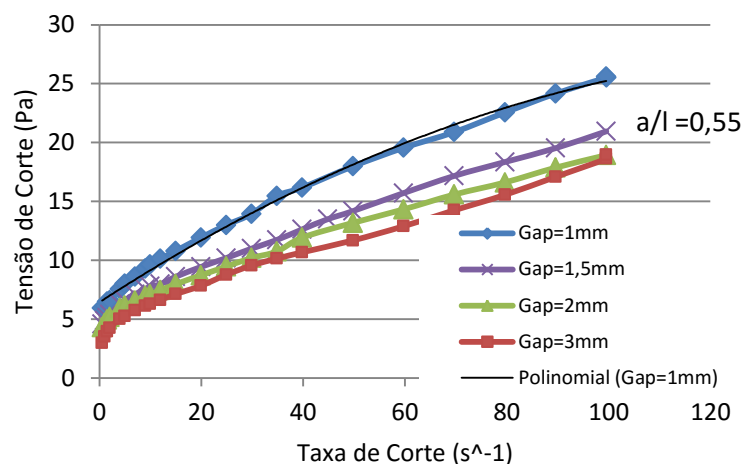


Figura 4.24 - Curvas de escoamento para um grout de $a/l = 0,55$, representadas para os diferentes gaps de medição (geometria de face rugosa; temperatura do prato constante de $20^{\circ}C$)

Para todas as misturas, o efeito direto da colocação de rugosidade nos parâmetros reológicos, é notado no valor estimado da tensão de cedência. Inicialmente, todas as formulações exibiam um valor quase nulo para este parâmetro, quando o afastamento entre placas era de $1mm$. E, é na mistura menos fluida, que este efeito se faz sentir – anteriormente, a geometria rodava sobre uma camada superficial mais coesa, devido à impossibilidade de transmitir o movimento a toda a amostra – com a introdução de uma superfície rugosa, o atrito na interface proporciona maior adesividade entre a geometria e o grout.

Assim, ao invés de afastar as partículas, criando uma depressão na amostra – que obrigaria a geometria a rodar sobre uma camada muito superficial e pouco representativa – a lixa leva todas as partículas a girarem uniformemente.

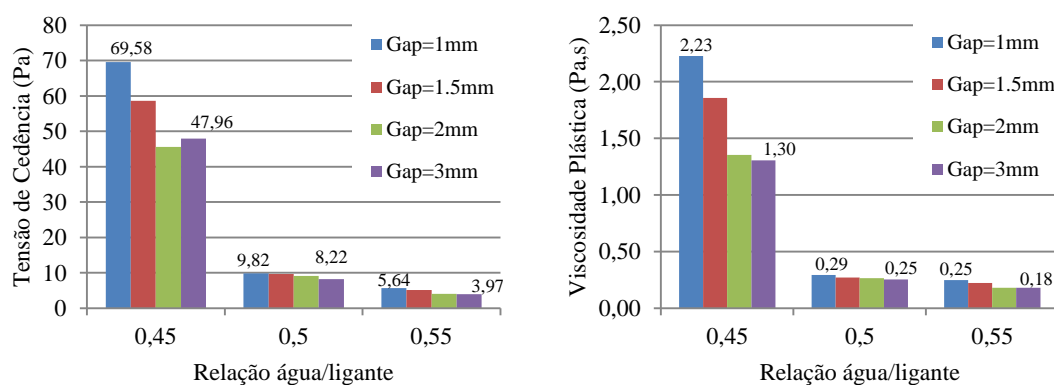


Figura 4.25 - Viscosidade aparente e tensão de cedência obtidos pela equação de Bingham modificada, para diferentes dosagens de água e para os vários gaps (geometria rugosa)

4.2.3.2. Contribuição da rugosidade do prato nos parâmetros reológicos

Nos gráficos seguintes, pode observar-se o efeito do escorregamento para os diferentes rácios a/l , concretamente para um gap intermédio igual a 2mm (mantendo-se sempre a dosagem de $\text{SP} = 1\%$, relativamente à massa de ligante e a temperatura do prato constante de 20°C). Impunha-se, nesta demonstração, que o valor do gap não fosse nem demasiado baixo, para não ocorrer um espalhamento significativo da amostra, nem demasiado alto para não estar sujeito aos efeitos do escorregamento. Desta forma, pretende-se mostrar um comportamento reológico, das várias misturas, que seja o mais próximo possível da realidade.

Nas figuras 4.26 a 4.28 representam-se, lado-a-lado, as curvas de fluxo traçadas recorrendo a geometria com lixa e outra com geometria de face lisa. Como já tinha sido avançado anteriormente, com o aumento da dosagem de água, a curva de fluxo referente ao ensaio com superfície rugosa, começa a apresentar um comportamento mais próximo de um fluido de Bingham e é bem marcada a presença de uma tensão de cedência, a partir da qual, o fluido inicia o escoamento.

Contudo, um ajuste segundo o modelo matemático de Bingham modificado continua a ser o que melhor descreve o escoamento à medida que se aumenta o rácio a/l .

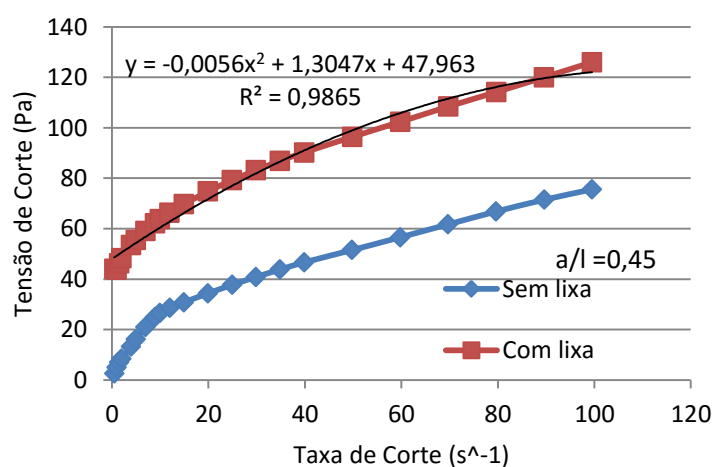


Figura 4.26 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com rácio $a/l = 0,45$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa (gap = 2mm ; temperatura do prato constante de 20°C)

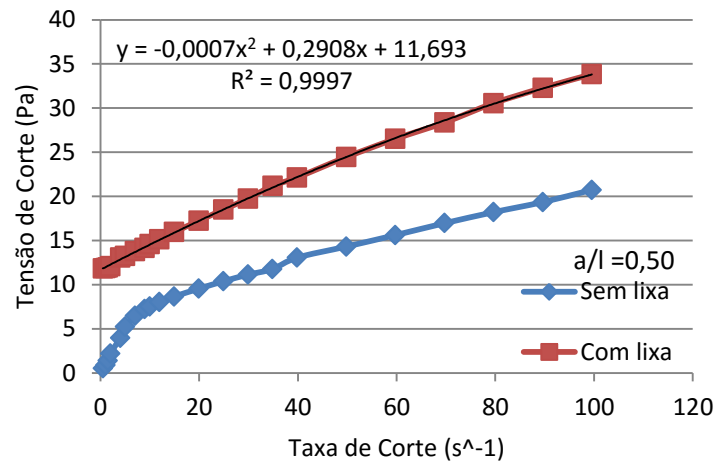


Figura 4.27 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com rácio $a/l = 0,5$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa (gap= 2mm; temperatura do prato constante de 20°C)

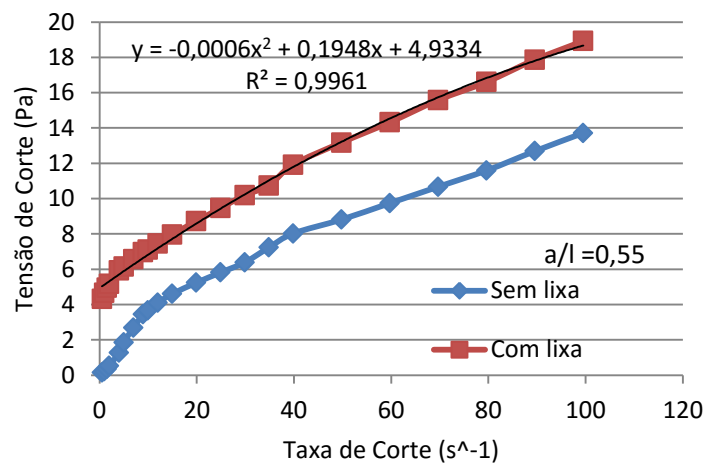


Figura 4.28 - Comparação de curvas de fluxo de um grout com rácio $a/l = 0,55$, obtidas através de geometria de face lisa e rugosa (gap= 2mm; temperatura do prato constante de 20°C)

Nas figuras seguintes (ver fig. 4.29, 4.30 e 4.31), confrontam-se os resultados dos parâmetros reológicos, obtidos segundo o ajustamento com o modelo de Bingham modificado e com o modelo de Bingham, para as diferentes dosagens de água (mantendo o gap = 2mm e uma temperatura do prato constante de 20°C).

Como se pode observar no primeiro gráfico (ver fig. 4.29), para o valor da tensão de cedência, no caso da geometria lisa, é claro o erro de medição provocado pelo escorregamento, quando se compara o valor deste mesmo parâmetro com o valor homólogo, estimado com uma geometria rugosa, calculado a partir de um modelo de ajuste que por norma o subestima. O erro concreto para a tensão de cedência estimada entre a geometria lisa e a rugosa, é de 79% para a mistura mais pastosa, supondo que a lixa reduz significativamente o efeito do escorregamento. Mannheimer afirmou mesmo, que o escorregamento provocava erros de estimação na tensão de cedência de cerca de 85%, enquanto

Banfill e Kitching (2006) observaram erros na ordem dos 90%. Para as restantes formulações – $a/l = 0,5$ e $0,55$ – o erro decresce significativamente para 4,2% e 4,4%, respetivamente.

No caso da viscosidade plástica, para a mistura menos fluida, a diferença já não é tão acentuada. Confirma-se, assim, a hipótese de que não é tão gravoso, como no caso da tensão de cedência, optar por um ou outro modelo de ajustamento (Bingham ou Bingham modificado) quando se pretende estimar a viscosidade plástica.

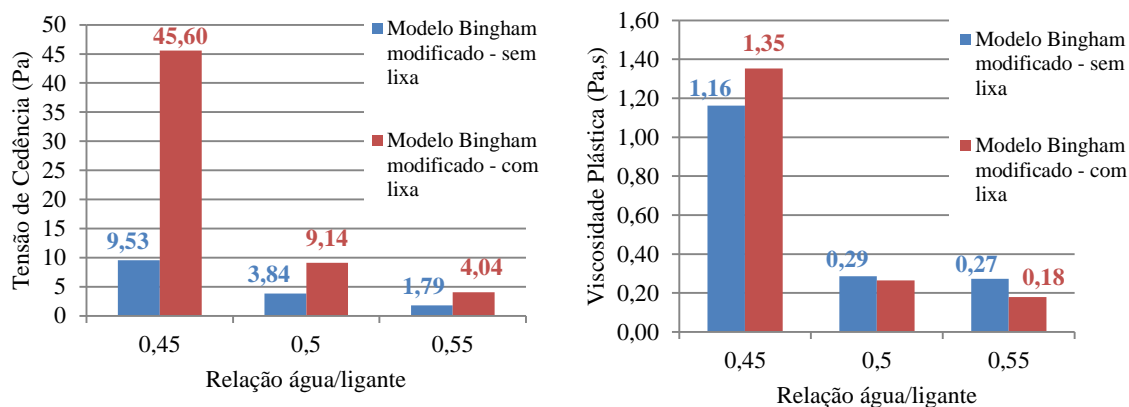


Figura 4.29 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes rácios a/l , obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado)

A figura 4.30 pretende mostrar um ligeiro melhoramento no erro de estimação da tensão de cedência, quando se opta por ajustar o modelo de Bingham à curva de fluxo, sem considerar o troço inicial, onde existe uma maior variação da tensão de corte. É uma situação contrária à descrita por Rhaman, quando comparava as medições reológicas de pastas de cimento (100% cimento Portland tipo-I – segundo a norma ASTM – sem adições e adjuvantes), com rácios a/l de 0,5 e 0,4. Este, afirmava que: “as diferenças na estimação da tensão de cedência, entre o modelo de Bingham e de Bingham modificado, geralmente decrescem com a redução do rácio a/l .” (Nehdi e Rahman, 2004)

No caso apresentado neste estudo, faz mais sentido afirmar o contrário, ou seja, que as diferenças entre os parâmetros reológicos, calculados por um e outro modelo, se esbatem quando se aumenta o rácio a/l . Não obstante, volta-se a vincar, que as circunstâncias dos ensaios são diferentes, e que, por mais semelhantes que sejam as características entre as pastas cimentícias e os grouts de cal hidráulica, os dados do primeiro tipo só podem servir como referência aos do segundo. Ainda assim, o erro continua a ser da ordem dos 48%, donde se pode concluir, que a hipótese de que o escorregamento só ocorre para tensões de corte mais baixas, até ser atingida a tensão de cedência, é enganadora.

Como se pode observar no gráfico (ver fig. 4.30), mesmo com um modelo que normalmente sobrestima o valor da tensão de cedência, no caso da geometria lisa, é claro o erro de medição

provocado pelo escorregamento, quando se compara o valor deste com o mesmo parâmetro estimado com uma geometria rugosa e calculado a partir de um modelo de ajuste, que por norma o subestima.

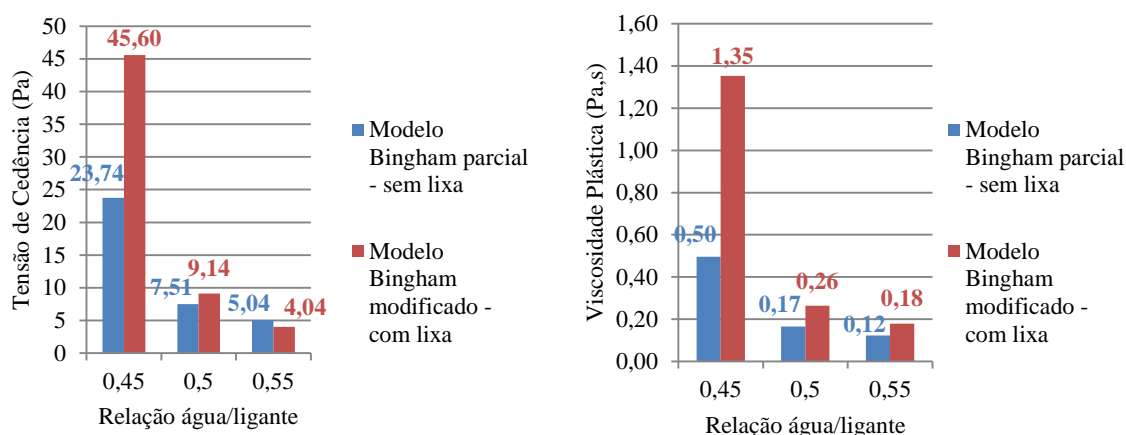


Figura 4.30 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes rácios a/l, obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham parcial) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado)

Finalmente, quando confrontados os valores do modelo de Bingham, ajustado a toda a curva de valores medidos com geometria lisa, a melhoria verificada é ao nível da viscosidade plástica.

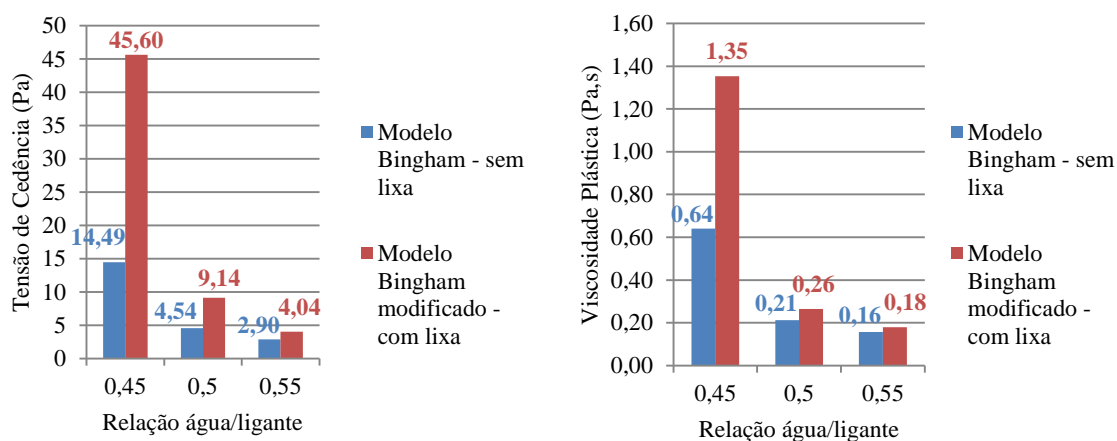


Figura 4.31 - Comparação de parâmetros reológicos para os diferentes rácios a/l, obtidos a partir de geometria de face lisa (ajuste com modelo de Bingham) e rugosa (ajuste com modelo de Bingham modificado).

Pode, assim, afirmar-se que, no caso das misturas mais fluidas, nas medições reológicas com pratos lisos a melhor abordagem de caracterização do escoamento será o modelo de Bingham sem considerar o troço inicial. Pois, como é evidenciado pela figura 4.29, apresenta menores disparidades entre os valores da tensão de cedência, em relação ao modelo de Bingham modificado.

5. Conclusão e desenvolvimentos Futuros

O estudo da influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas realizou-se para três formulações de *grouts* ($a/l = 0,45$; $0,5$ e $0,55$). Optou por se fixar a dosagem de superplastificante das misturas em 1% (relativamente ao peso de ligante), de forma a isolar o rácio a/l como principal regulador das características do escoamento. Apesar de o aumento do rácio a/l ter um efeito, a nível reológico, semelhante ao do superplastificante, principalmente na diminuição do valor da tensão de cedência e da viscosidade plástica, é prejudicial ao comportamento da mistura, aumentando a probabilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade.

Assim, os resultados obtidos na campanha experimental dividem-se em dois grupos: os de fluidez-estabilidade e os reométricos. No primeiro grupo de resultados, apenas se pretende evidenciar o padrão de comportamento dos *grouts*, face a um incremento ou a um défice da quantidade água na sua composição. As conclusões apresentadas de seguida não pretendem, portanto, introduzir novos conceitos, mas sim sustentar as conclusões do segundo grupo de resultados, apresentadas no ponto 5.2.

5.1. Ensaio de fluidez e de espalhamento

- O aumento da presença de água entre as misturas mais fluidas ($a/l = 0,50$ e $0,55$), não altera significativamente o tempo de escoamento, ao contrário do que se verifica quando se passa deste tipo de rácios, para outros menor valor ($a/l = 0,45$). Esta situação pode ser interpretada como uma maior sensibilidade da viscosidade a alterações da quantidade de água, à medida que o rácio a/l decresce.

- Os diâmetros do ensaio de espalhamento não nos permitem aferir com rigor a tensão de cedência dos *grouts*, pois são retirados valores muito semelhantes de espalhamento entre as várias formulações. Na realidade, não se verifica a mesma tendência de proximidade das tensões de cedência entre cada formulação, o que permite afirmar que este é um parâmetro reológico mais sensível à presença de água do que a viscosidade. O efeito da perda de água neste parâmetro torna-se mais proeminente à medida que o rácio a/l decresce.

- **Ensaio de estabilidade**

- A observação das curvas de evolução da percentagem de massa volúmica á superfície do *grout*, descritas pelas formulações mais fluidas - $a/l = 0,5$ e $0,55$ - permite distinguir um comportamento semelhante entre as duas, durante os 60 minutos de leitura. Como era expetável, na mistura com um rácio $a/l = 0,55$, ocorre um decréscimo mais acentuado na percentagem de massa volúmica inicial (cerca de 33%), podendo ser considerada a mais instável das duas. Contudo,

apresenta uma variação baixa, se comparada com o comportamento da formulação de rácio $a/l = 0,5$ (quebra de 26%).

- A mistura com menor proporção entre água e ligante ($a/l = 0,45$) revelou-se incompatível com este ensaio de estabilidade.

- **Ensaio de retenção de água**

- Para a mesma quantidade de água recolhida na proveta graduada, compreende-se claramente, que a relação a/l tem uma influência direta no tempo extração. Quanto menor for esse rácio, mais demorada é a saída de água. De acordo com esta tendência, a mistura com um rácio $a/l = 0,45$ apresenta maior retenção de água, seguida pelos rácios de 0,5 e 0,55.

- Em todas as formulações é notória uma maior perda de água durante os primeiros 10 minutos do ensaio: $a/l = 0,45$ perde 4,82% de água nos primeiros 5min do ensaio, acumulando perdas de 9,65% aos 10min; para $a/l = 0,5$, são perdidos em 5min 7,81% de água e 12,18% aos 10min; $a/l = 0,55$, em 5min perde 10,70% de água, com mais 5min passados perde 16,83%.

Pode significar que este é um período crítico nas condições de injeção, quer quando se submete o *grout* a pressões de vácuo durante o processo de injeção, quer devido à capacidade de absorção dos materiais do interior da alvenaria onde são inseridos.

- **Ensaio de retenção de água Vs. viscosidade aparente**

As conclusões adicionais do ensaio de retenção Vs. viscosidade aparente são relevantes, na medida, em que nos permitem prever a capacidade de penetração do *grout* no meio poroso das alvenarias, sabendo exatamente qual a quantidade crítica de água que este pode perder, em detrimento da sua fluidez, durante o tempo de injeção:

- A mistura considerada mais instável nos procedimentos experimentais anteriores ($a/l = 0,55$) continua a confirmar essa tendência, experimentando uma mudança de viscosidade de 0,25 – 5,7 [Pa. s] ao longo deste ensaio.

- A mistura com um rácio $a/l = 0,5$ apresenta um intervalo de valores de η_a , que varia entre 0,7 – 3,6 [Pa. s]. No entanto, é de assinalar, que esta mudança brusca nos valores de η_a , para as misturas mais fluidas, se verifica quando já tinha sido induzida uma drenagem de 0,40ml, ou seja, próximo do limite de 60ml definido para o ensaio. Este volume de perda de água marca o limite crítico, a partir do qual, poderão ocorrer bloqueios ao livre avanço de *grout*.

- O *grout* com o rácio a/l mais baixo, demonstrou uma retenção de água bastante alta, com uma variação de viscosidade aparente pouco considerável: 1-1,5[Pa.s] e um tempo de extração de 60ml que atingiu os 48min.

5.2. Análise do fenómeno de escorregamento nas medições reológicas dos *grouts*

Esta fase da campanha experimental dividiu-se em duas partes: a primeira envolvendo medições reológicas feitas com recurso a uma geometria de face lisa e, a segunda, recorrendo à colagem de uma lixa para dotar a mesma geometria com uma face bastante mais rugosa, de forma a ultrapassar os efeitos do fenómeno de escorregamento. Devido à impossibilidade de efetuar os ensaios com uma superfície serrada, como é recomendado pelo protocolo da marca que produz o reómetro – Malvern Instruments – optou-se por uma solução mais económica e igualmente válida, de forma a eliminar os efeitos do escorregamento quantificado anteriormente.

Nesta secção mostra-se a caracterização reológica dos *grouts*, feita numa primeira fase, precedendo a apresentação das conclusões retiradas do processo de quantificação do escorregamento:

- Todas as misturas evidenciam uma forte propensão reofluídificante.
- Com o ajuste entre os valores medidos no reómetro, através da equação de Bingham modificada, foi possível caracterizar os parâmetros reológicos (τ_0 , η e τ) dos *grouts*. Nas curvas de fluxo analisadas, é clara a existência de dois troços distintos, caracterizados por dois declives. O primeiro troço é caracterizado por taxas de corte mais baixas, com um limite próximo de $10s^{-1}$. Aqui, o declive é mais acentuado devido a uma variação brusca das tensões de corte, que atuam no *grout*. Deste ponto em diante, ocorre uma mudança na resposta do fluido às taxas de corte mais altas, marcando o início do segundo troço, com uma evolução de tensões mais suave. Por questões de demonstração, foi-lhe posteriormente ajustada a equação de Bingham a estas curvas de fluxo. Como seria de prever, retira-se que a tensão de cedência é sobrestimada, devido à incompatibilidade do modelo em se ajustar aos valores de tensão mais baixos.
- Com base nos valores retirados do modelo de ajustamento de Bingham modificado, foi possível quantificar reologicamente a influência da quantidade de água nas misturas. Da formulação de rácio a/l= 0,45 para a de 0,5, propriedades como a tensão de cedência e a viscosidade plástica, vêm o seu valor reduzido em quatro vezes, aproximadamente.
- A viscosidade plástica, como seria de esperar, é claramente superior nas misturas menos fluidas, mostrando relativa estabilidade aquando da alternância de *gaps*. Nas formulações mais fluidas, as diferenças entre os parâmetros reológicos (τ_0 , η e τ), medidos pelos dois modelos de ajustamento

matemático, são pouco notórias. Pode afirmar-se, que não seria gravoso optar-se por um ou outro modelo de ajustamento.

- É evidente a influência do *gap* de medição na determinação da tensão de cedência. Quando é aplicado um *gap* de 1mm entre as placas, para as três dosagens de água diferentes, a tensão de cedência é praticamente inexistente. À medida que o *gap* é aumentado, observa-se um crescimento significativo deste parâmetro. Este efeito é mais destacado para o *grout* mais pastoso, tendo menor impacto para as misturas mais fluidas ($a/l = 0,5$ e $0,55$), onde os valores se apresentam mais constantes.

- **Quantificação do escorregamento em função do *gap*, tensão de corte e rácio a/l (alternando a rugosidade das geometrias)**

- A alternância da rugosidade das geometrias entre face lisa e rugosa, com recurso à colagem de uma lixa na face lisa, conduziu à obtenção de resultados bastante interessantes, do ponto de vista reológico. Provou ser uma forma viável de reduzir significativamente o grau de escorregamento.

- Pôde concluir-se que a velocidade de escorregamento aumenta para tensões de corte mais altas, sendo agravada à medida que se aumenta o *gap*.

- Para a mistura de rácio $a/l = 0,5$ foi possível eliminar a velocidade de escorregamento para a gama de tensões de corte de 10 a 15Pa e reduzir o seu impacto em 50% para a tensão de 20Pa.

- Para um rácio $a/l = 0,55$, a velocidade de escorregamento caiu 18% para a aplicação de uma tensão de 10Pa e 13% nas duas gamas de tensões seguintes (15 e 20Pa).

- Esta observação realça a dependência da estabilidade da mistura, em função da quantidade de água que, para rácios a/l e valores de *gap* maiores, faz com que os *grouts* experimentem um incremento da velocidade de escorregamento à medida que a tensão de corte aumenta.

- Para todas as misturas, o efeito direto da colocação de rugosidade nos parâmetros reológicos, é notado na determinação do valor da tensão de cedência, que era subestimado pelo reómetro antes de se colocar a lixa na face da geometria.

- Quanto ao comportamento das curvas de fluxo, mantém-se a propensão fluidificante. No entanto, com o aumento da dosagem de água, as curvas começam a apresentar um comportamento cada vez mais próximo de um fluido de Bingham. É, também, evidente a presença de uma tensão de cedência, a partir da qual, o fluido inicia o escoamento, ao contrário do que acontecia nas curvas obtidas com a geometria de superfície lisa. Contudo, um ajuste segundo o modelo matemático de

Bingham modificado continua a ser o que melhor descreve o escoamento à medida que se aumenta o rácio a/l.

Espera-se que em estudos futuros, aproveitando os resultados obtidos ao longo deste trabalho, seja possível definir um protocolo de ensaio de *grouts* à base de cal hidráulica

Idealmente, através do esforço conjunto de todas as partes envolvidas, deveria normalizar-se o processo de medição reológica e os métodos de cálculo. Só assim se poderá criar uma base de dados viável, de modo a que os resultados de diferentes autores possam ser comparados e ultrapassar as dificuldades de caracterização reológica de *grouts*, destacadas ao longo deste trabalho.

Bibliografia

- Adami, C.-E., e Vintzileou, E. (2008) - *Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts*. Materials and Structures, 41(2), 255–267. <http://doi.org/10.1617/s11527-007-9235-z>
- Agulló, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., e Aguado, A. (1999) - *Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer—A study based on the Marsh cone test*. Materials and Structures. <http://doi.org/10.1007/BF02481631>
- Assaad, J. J. (2015) - *Correlating water extraction to viscosity variations of injection grouts*. Construction and Building Materials, 77, 74–82. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.024>
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Cardoso, T. e Cidade, M. T. (2015) - *Wall Slip on Rheological Measurements of injection Grouts*. Challenges in rheology and product development, IBEREO 2015 Proceedings
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., e Jorne, F. (2012) - *Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. Construction and Building Materials, 35, 838–845. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.084>
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., e Cidade, M. T. (2013) - *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. Rheologica Acta, 52(2), 127–138. <http://doi.org/10.1007/s00397-013-0674-x>
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., e Cidade, M. T. (2014) - *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. Construction and Building Materials, 50, 584–597. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.005>
- Baltazar, Luis G., Fernando M. A. Henriques, F. J. (2012) - *Hydraulic lime grouts for masonry injection - effects of admixtures on the fresh grout properties*. Strutural Analysis of Historical Constructions - Jerzy Jasinko (ed), 1763–1770.
- Banfill, P. F. G. (2006) - *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Rheology Reviews, 2006, 61–130. <http://doi.org/10.4324/9780203473290>
- Barnes, H. A. - *A handbook of elementary rheology*, University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Department of Mathematics, University of Wales Aberystwyth, Penglais, Aberystwyth, Dyfed, Wales (SY23 3BZ), 2000
- BASF, the chemical company. (2008) - *Mode of Action of Superplasticizers for cement based construction materials*. Technical Leaflet.
- Binda, L., Modena, C., Baronio, G., e Abbaneo, S. (1997) - *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, 11(3), 133–142. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00031-7](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00031-7)
- Binda, L., e Saisi, A. (2002) - *State of the art of research on historic structures in Italy. Proceedings of 11th Advanced Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe (ARIADNE)*

workshop, May 20-26, 2002. *Dep. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy*. Retrieved from http://www.arcchip.cz/w11/w11_binda.pdf

- Borges, C., Santos Silva, A., e Veiga, R. (2014) - *Durability of ancient lime mortars in humid environment*. Construction and Building Materials, 66, 606–620. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.019>
- Bras, A., e Henriques, F. M. A. (2012) - *Natural hydraulic lime based grouts - The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, 26(1), 135–144. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.012>
- Cappellari, M., Daubresse, A., e Chaouche, M. (2013) - *Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention*. Construction and Building Materials, 38, 950–961. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.055>
- Cardoso, F. A., John, V. M., Pileggi, R. G., e Banfill, P. F. G. (2014) - *Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry*. Cement and Concrete Research, 57, 79–87. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.009>
- Corradi, M., Borri, A., e Vignoli, A. (2002) - *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria – Marche earthquake of 1997 – 1998*. Construction and Building Materials, 16, 229–239.
- Demir, C., e Ilki, A. (2014) - *Characterization of the materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in Istanbul, Turkey*. Construction and Building Materials, 64, 398–413. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.099>
- Gao, J., e Fourie, A. (2015) - *Spread is better: An investigation of the mini-slump test*. Minerals Engineering, 71, 120–132. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.001>
- Gonçalves, N. (2013) - *Caldas de Injecção Pré-Doseadas para Alvenarias Antigas Estudo da Capacidade de Injecção*, Dissertação de Mestrado, IST
- Hanehara, S., e Yamada, K. (2008) - *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Research, 38(2), 175–195. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.006>
- Hanley, R., e Pavía, S. (2008) - *A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength*. Materials and Structures, 41(2), 373–381. <http://doi.org/10.1617/s11527-007-9250-0>
- Henriques, F. M. A. (2011). *Comportamento higrotérmico de edifícios*, Publicação na sebeta da cadeira de Física das Construções, FCT
- Jorne, F., Henriques, F., & Baltazar, L. (2014) - *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, 48, 2211–2233. <http://doi.org/10.1617/s11527-014-0304-9>
- Lourenço, E. L. e P. B. (2014). *Consolidação e reforço de Paredes Antigas de Alvenaria de Pedra. Injecção com Caldas*. Rehabend.
- Lourenço, P. B. (2006) - *Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney*. Construction and Building Materials, 20(4), 239–251. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.026>

- Lourenço, P. B., Ramos, L. F., Vasconcelos, G., e Peña, F. (2008)- *Monastery of Salzedas (Portugal): intervention in the cloister and information management*. Structural analysis of historic construction: preserving safety and significance: proceedings of the Sixth International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, 2-4 July 2008, Bath, United Kingdom (Vol. 1983).
- Luso, E. C. P. (2012) - *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*. Ph.D. thesis, Universidade do Minho.
- Malvern Instruments. (2012) - *Overcoming and quantifying “ Wall Slip ” in measurements made on a rotational rheometer*, Malvern Instruments Company
- M. Rosário Veiga e Paulina Faria. (1990) - *Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética*, LNEC
- Martínez, I., Castillo, A., Martínez, E., e Castellote, M. (2013) - *Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention*. Construction and Building Materials, 40, 352–360. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.091>
- Mascarenhas, Jorge – Sistemas da construção III – Paredes (2ª parte) e Materiais básicos (1ª parte). Livros Horizonte, 2003
- Matias, G., Faria, P., e Torres, I. (2014)- *Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behaviour*. Construction and Building Materials, 73, 523–534. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>
- Matos, J. (2013) - *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*, Dissertação de Mestrado, FCT
- Miguel, F., e Borralho, B. (2013). *Caldas de Injeção Pré-doseadas para Alvenarias Antigas Estudo da Aderência*, Dissertação de Mestrado, IST
- Miltiadou-Fezans, A., e Tassios, T. P. (2012) - *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, 45, 1817–1828. <http://doi.org/10.1617/s11527-012-9872-8>
- Miltiadou-Fezans, A., e Tassios, T. P. (2013) - *Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, 46, 1631–1652. <http://doi.org/10.1617/s11527-012-9872-8>
- Nehdi, M., e Rahman, M. A. (2004) - *Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction*. Cement and Concrete Research, 34(11), 1993–2007. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.020>
- Nguyen, V. H., Remond, S., e Gallias, J. L. (2011) - *Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour*. Cement and Concrete Research, 41(3), 292–300. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.015>
- Penazzi, D., Valluzzi, M. R., Saisi, A., Binda, L., e Modena, C. (2001). *Repair and strengthening of historic masonry buildings in seismic areas*. Int. Congr. More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of Our Architectural Heritage, Bethlehem,(Palestine), 2, 1–7.

- Piotrowski, D., e Cierniewski, C. (1982). *Introduction to rheology*. Acta Haematologica Polonica, 13(3-4), 177–186. <http://doi.org/10.1007/s00234-003-1051-8>
- Raquel, J., e Roseiro, F. (2012) - *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos Estudo de caso*, Dissertação de Mestrado, FCT
- Rodríguez-navarro, C. (2012) - *Binders in historical buildings: Traditional lime in conservation*. Seminarios SEM, 9, 91–112. Retrieved from http://www.ehu.es/sem/revista/seminarios_m.htm#Vol9
- Rosquoët, F., Alexis, A., Khelidj, A., e Phelipot, A. (2003) - *Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation*. Cement and Concrete Research, 33(5), 713–722. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01036-0](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01036-0)
- Roussel, N., e Le Roy, R. (2005). *The Marsh cone: A test or a rheological apparatus?* Cement and Concrete Research, 35(5), 823–830. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.019>
- Saak, A. W., Jennings, H. M., e Shah, S. P. (2001) - *The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste*. Cement and Concrete Research, 31(2), 205–212. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00440-3](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00440-3)
- Sequeira, A., Frade, D., e Gonçalves, P. (2007) - *Cal Hidráulica—Um ligante para a reabilitação. Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS*. Retrieved from http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper_61_07.pdf
- Silva, B., Dalla Benetta, M., Da Porto, F., e Modena, C. (2014) - *Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls*. Construction and Building Materials, 53, 149–161. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.084>
- Silva, B. L. (2012) - *Diagnosis and Strengthening of Historical Masonry Structures: Numerical and Experimental Analysis*. PhD Thesis.
- Sonebi M., Lachemi M., Hossain K.M.A., (2012) - *Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture*, Construction and Building Materials, 38, 126-138.)
- Theodoridou, M., Ioannou, I., e Philokyprou, M. (2013) - *New evidence of early use of artificial pozzolanic material in mortars*. Journal of Archaeological Science, 40(8), 3263–3269. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2013.03.027>
- Toumbakari, E. – *Lime-pozzolan cement grouts and their structural effect on composite masonry walls*, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2002
- Valluzzi, M. (2000) - *Comportamento Meccanico di Murature Consolidate Com Materiali e Tecniche a Base di Calce*, Tesi de Dottorato, Università Degli Studi di Trieste
- Van Gemert, D., Ignoul, S., Brosens, K., e Toumbakari, E.-E. (2015) - *Consolidation and Strengthening of Historical Masonry by Means of Mineral Grouts: Grout Development*. Restoration of Buildings and Monuments, 21(1), 29–45. <http://doi.org/10.1515/rbm-2015-0004>
- Van Rickstal F. (2000), *Grout injection of masonry, scientific approach and modelling*, Ph.D Thesis, K.U. Leuven

Vintzileou, E (2006) - *Grouting of Three-leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry before and after Grouting*, Strutural Analysis of Historical Constructions, Lourenço P. B., Roca P., Modena C., Agrawal S. (eds), New Dehli.

Welton, R. G., Cuthbert, S. J., McLean, R., Hursthouse, A., & Hughes, J. (2003) - *A preliminary study of the phycological degradation of natural stone masonry*. Environmental Geochemistry and Health, 25(1), 139–145. <http://doi.org/10.1023/A:1021221603859>

Normas

- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standart Test Methos for Water Retentivity of Grout Mixture for Preplaced-Aggregate Concrete*, C 941-02, United States, ASTM, 2002
- NP EN 445 - Caldas de injeccção para armaduras de pré-esforço - Métodos de ensaio, Norma Portuguesa, 2008

Sítios na Internet

- Quadro 2.1: <http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/ad/05%20-%20Alvenaria%20de%20pedra-patologia%20e%20Inspec%C3%A7%C3%A3o%20-%20COR.pdf>
- Fig. 2.4: Polymeric Stabilization of Colloidal Dispersions, Academic Press, New York, 1983 - http://depts.washington.edu/solgel/pages/courses/MSE_502/Electrostatic_Stabilization.html
- Fig. 2.7: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9929>
- Fig. 2.9: <http://wiley-vch.e-bookshelf.de/products/reading-epub/product-id/3937491/title/Product%2BDesign%2Band%2BEngineering.html?lang=dt>

ANEXO

Disseminação Preliminar de Resultados

Wall slip on rheological measurements of injection grouts

Luis G. Baltazar¹, Fernando M.A. Henriques¹, Tiago Cardoso¹, Maria Teresa Cidade²

¹Dpto Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal

²Dpto. Ciência dos Materiais and Cenimat/I3N, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal

Correspondence to: Luis G. Baltazar (luis.baltazar@fct.unl.pt)

ABSTRACT

In this study, the degree of wall slip on rheological measurements of injection grouts is investigated. Grouts can be seen as suspensions of binder particles in water which have a considerable fluidity in order to be successfully injected in many applications in civil engineering works such as consolidation of stone masonry walls. For the determination of wall slip in a rotational rheometer with parallel plates, stress controlled measurements at various gaps and different shear stress were carried out. Overall, our results revealed that wall slip is function of the shear stress and the grout composition. It was also found that the parallel plate with emery paper glued can be a solution to mitigate the slip. Results from this study can help to define an adequate measurement protocol to correctly infer the rheological properties of injection grouts by using parallel plates.

KEYWORDS: wall slip, injection grout, parallel plates, stone masonry

INTRODUCTION

Stone masonry is a constructive technique invented thousands of years ago. Its simplicity and durability lead to an extensive use and it represents the large majority of old buildings in many urban centers across Europe. Stone masonry, a non-homogeneous and non-monolithic composite material, has particular weakness which, associated with the absence of maintenance, increase the vulnerability of its structural integrity. Grout injection is an interesting solution to repair and reinforce old stone masonry walls, particularly those built with two exterior skins of stonework and a rubble core (see Fig 1a). This consolidation method is defined as the introduction of a fluid material injected under pressure into the masonry inner core (Fig. 1). Injection grouts aim to fill cracks, voids and at same time enable the bonding between masonry elements which is essential towards masonry integrity (monolithic behavior).

Grouts can be represented as biphasic system consisting of suspended particles (binder) in a continuous fluid phase (water). The efficacy of the grouts depends mainly on the injectability properties. Therefore, it is essential to evaluate the effectiveness of the injection grouts in terms of keeping their adequate properties. For that purpose controlling the rheological properties of grouts is crucial for successfully grouting process ^{1,2}. Notwithstanding, during rheological measurements many phenomena can arise which can lead to test results having no value at all. Several authors ^{3,4,5} have shown that wall slip can play a significant role during the rheological measurements of cementitious materials leading to an underestimation of the yield stress values and inaccurate viscosity results. The aim of the present research is to determine the degree of wall slip effect during rheological measurements of injection grouts in order to define an adequate measurement protocol.

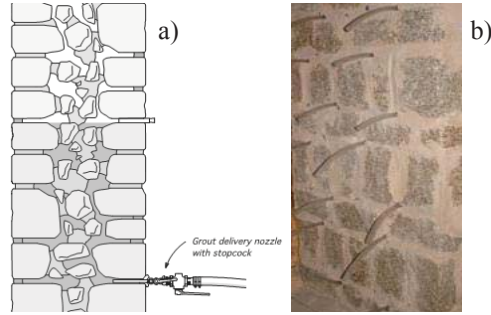


FIGURE 1 a) Example of a section of stone masonry wall core being grouted. b) Stone masonry with injection pipes.

METHODS

Rheological measurements were performed with a rotational rheometer (Bohlin Gemini HR^{nano}), equipped with a plate-plate geometry (with $\varnothing = 40\text{mm}$). The best way to confirm the presence of wall slip is taking measurements with smooth and serrated plates. However, in this case the authors did not have both geometry types available for such a comparison and so they have used an application note of Malvern⁶, which says that evidence of slip can be obtained by performing stress controlled measurements at different gaps. If slip occurs then the slip velocity (V_s) will depend only on the applied shear stress (σ) but not on the gap (h). Thus by varying the gap and keeping the stress constant it is possible to determine the slip velocity and the true shear rate using Equation 1. This can be performed by plotting the measured shear rate against $1/h$ which should result in a straight line with gradient $2.V_s$ and intercept γ .

$$\gamma_m = \frac{V}{h} = \frac{2.V_s}{h} + \gamma \quad (1)$$

Where V is the velocity of the upper plate; γ_m is the measured shear rate and γ is the true shear rate.

All rheological measurements were carried out at 20°C. Single shear measurements at various gaps of 1mm, 1.5mm, 2mm and 3mm using constant applied stresses of 10 Pa, 15 Pa and 20 Pa were conducted. The measured shear rate was then plotted against the inverse gap and a linear regression model fitted. This way the slip velocity and true shear rate can be estimated from the gradient and intercept respectively.

MATERIALS

The experimental program was conducted using a natural hydraulic lime (NHL) produced according to the European standard EN459-1:2010 and the following water/binder ratios (w/b) 0.45, 0.50 and 0.55 was used. NHL was chosen as binder, since it is a hydraulic binder that presents chemical and physical properties closer to those of preexisting materials in old masonries. A commercially available polycarboxylate ether superplasticizer (conforming to ASTM C494-05 Type F) with a constant dosage of 1wt% was used.

RESULTS AND DISCUSSION

Example of measured shear rate versus inverse gap is presented in Fig. 2 for NHL-based grout with water/binder ratio of 0.45 at different shear stresses. As previously mentioned to estimate the slip velocity a linear model fit was applied to the data with gradient of the line equal to $2.V_s$ and the intercept equal to the true shear rate. For the grout with water/binder of 0.45 the slip velocity was estimated to be 2.2mm/s, 3.8mm/s and 5.2mm/s and the true shear rate 0.7s^{-1} , 1.4s^{-1} and 1.7s^{-1} for the shear stress of 10Pa, 15Pa and 20Pa, respectively. This is quite lower than the measured shear rate range $2\text{-}5\text{ s}^{-1}$, $4\text{-}9\text{ s}^{-1}$ and $5\text{-}12\text{ s}^{-1}$ for each shear stress, which suggest a significant degree of wall slip.

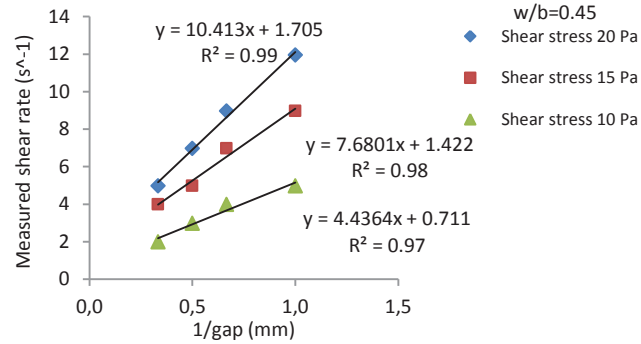


FIGURE 2 Measured shear rate vs 1/gap at different shear stress for the grout with w/b of 0.45.

The profiles of measured shear rate versus gap obtained for the other water/binder ratios are presented in Fig 3 and Fig. 4. From Fig 3, it can be seen that for the shear stress of 10Pa an approximately constant shear rate at each gap was obtained, which means no wall slip occurred. On the contrary, the higher shear stresses show a slight gradient (slip velocity) with higher shear rate reported at bigger gaps which is attributed to wall slip. It should be noted that for the shear stress of 15Pa the wall slip only begins at the biggest gap.

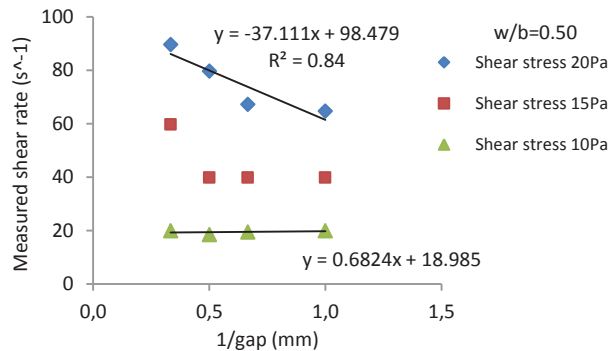


FIGURE 3 Measured shear rate vs 1/gap at different shear stress for the grout with w/b of 0.50.

From the results presented it is clear that the degree of wall slip (i.e. slip viscosity) increases with increasing shear stress. Moreover, it can also be observed that the trend of the curve shear rate vs 1/gap is function of the water/binder content. At the lower water/binder content (w/b=0.45) the slope is positive which means that the wall slip is likely to cause an overestimation of rheological parameters. As the water/binder content is increased the slope of the curve becomes negative meaning a tendency to underestimation of the parameters as result of the wall slip. This behavior is associated with greater tendency to segregation as the amount of free water in the suspension increases. This can be explained by the uniform settlement of binder particles, leaving a thin layer of water over the surface. Therefore local properties are changed, leading to an improper evaluation of yield stress, which can be over or under estimated as evidenced by the different slope sign of the linear models.

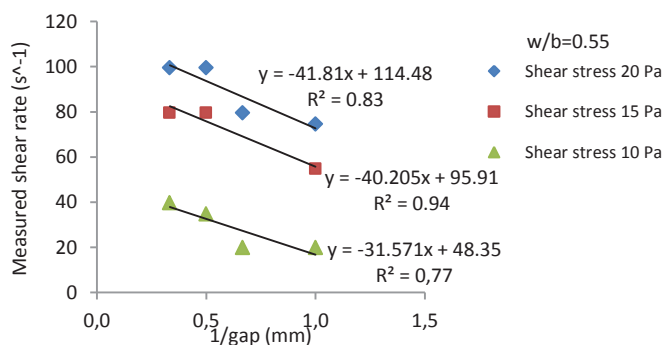


FIGURE 4 Measured shear rate vs 1/gap at different shear stress for the grout with w/b of 0.55.

Considering the above results, serrated plates should be used to avoid slip. Since the authors did not have serrated plates available, some measurements with plates with emery papers glued were performed. This is an ongoing work but the preliminary results are quite promising. From Fig 5 it is clear the difference between the flow curves obtained with smooth parallel plate and the one with emery paper glued. There is no doubt that the sharp change in trend of the flow curve obtained with smooth plates (see Fig 5a) is related to slip at plate-grout interface. While for the plate with emery paper glued a gradual deviation of the stress curve from linearity as the shear rate increases is verified. Thus, it can be stated that the emery paper glued to the smooth plates can be a good solution to avoid slip during rheological measurements of injection grouts.

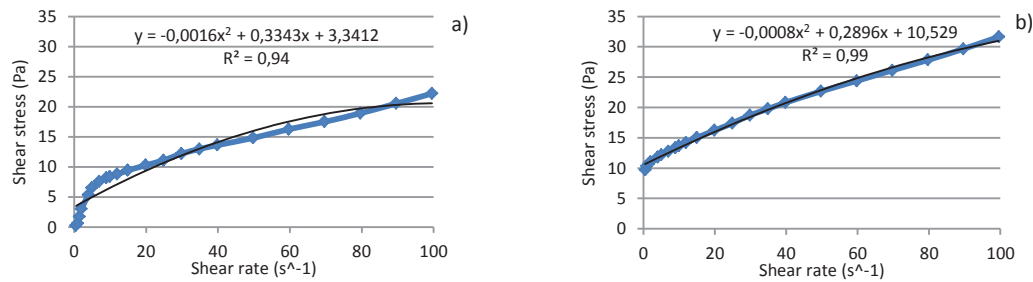


FIGURE 5 Influence of geometry roughness on the flow curve behavior for the grout with $w/b=0.50$ at a gap of 3mm a) smooth parallel plate and b) parallel plate with emery paper glued.

CONCLUSIONS

In the light of the achieved results, it is clear that for rheological measurements of injection grouts using a rotational rheometer equipped with smooth parallel plates some aspect have to be taken into account in order to avoid getting significant error in the results. A suitable choice of shear stress range applied during the rheological measurement should be made, since the higher shear stress increases the degree of wall slip. Moreover, a proper formulation of the grout is also recommended in order to avoid grouts with higher tendency to segregate that promote the wall slip. Preliminary measurements performed with parallel plate with emery paper glued reveal to be a viable way to avoid the slip. The results and procedures reported in this paper can therefore be used to estimate the degree of slip of a specific grout composition and indicate whether the use of roughened plates is required.

REFERENCES

1. Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F., Cidade, M.T., *Rheologica Acta*, **2013**, 50(2), 127-138.
2. Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F., Cidade, M.T., *Construction and Building Materials*, **2014**, 50, 584-597.
3. Banfill P.F.G., Rheology of fresh cement and concrete, In Rheol. Rev., British Society of Rheology, Uk, **2006**.
4. Nehdi M., Rahman M-A., *Cement and Concrete Research*, **2004**, 34, 1993-2007.
5. Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P., *Cement and Concrete Research*, **2001**, 31, 205-212.
6. Malvern - Application Note. Overcoming and quantifying 'Wall Slip' in measurements made on a rotational rheometer. Malvern Instruments – Spectris plc - the Precision Instrumentation and Controls Company, **2012**.